



António Maria Matos de Sousa

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Estudo numérico do efeito do vento e da vegetação no escoamento de correntes de densidade

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Moisés Gonçalves de Brito, Professor Auxiliar
Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa
Co-orientadores: Luís Miguel Chagas da Costa Gil, Professor
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa
Ana Margarida da Costa Ricardo, Investigador
Doutorado, Instituto Superior Técnico
da Universidade de Lisboa

Júri

Presidente: Professor Doutor Daniel Cardoso Vaz
Arguente: Professor Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal
Vogal: Professor Doutor Moisés Gonçalves de Brito



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro, 2020

AGRADECIMENTOS

Um grande agradecimento ao meu orientador, Prof. Doutor Moisés Gonçalves de Brito pelo apoio prestado ao longo da realização desta dissertação. A sua ambição contínua por melhores resultados e conclusões mais interessantes transpareceu claramente na forma como encarei o trabalho e na atitude com que encarei as dificuldades que foram surgindo. Estendo este agradecimento aos meus co-orientadores, Prof. Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil e Doutora Ana Margarida da Costa Ricardo, pela ajuda prestada sempre que solicitada. Um obrigado aos membros do júri, Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz e Prof. Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso, com os quais tive o prazer de partilhar este caminho académico, do qual retiro uma amizade para o futuro. A sua companhia e as nossas variadas conversas e opiniões trocadas foram certamente uma fonte de conhecimento e diversão que facilitaram bastante este percurso.

Agradeço profundamente à minha família pelo seu apoio incondicional e pela sua confiança no meu trabalho.

Por último, agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa e ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial pelo disponibilizar das instalações e dos recursos necessários à conclusão do curso e, em especial, desta dissertação.

A dissertação está inserida no âmbito do projeto WinTherface (referência PTDC/CTA-OHR/30561/2017): Mass exchange driven by wind and temperature in lake-wetland interfaces (correntes de densidade de origem térmica e por ação do vento na interface entre lagos e zonas húmidas) financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

-Falhámos a vida, menino!

– Creio que sim... Mas todo o mundo mais ou menos a falha. Isto é, falha-se sempre na realidade aquela vida que se planeou com a imaginação. Diz-se: «vou ser assim, porque a beleza está em ser assim». E nunca se é assim, é-se invariavelmente assado, como dizia o pobre marquês. Às vezes melhor, mas sempre diferente.

-José Maria Eça de Queirós, Os Maias

RESUMO

Nas zonas de transição de lagos pouco profundos para zonas húmidas registam-se frequentemente variações significativas de temperatura, diferenças na salinidade das águas e/ou a existência de sedimentos em deposição. Estas variações induzem diferenças na massa volúmica da água que podem originar correntes de densidade. No entanto, esta estrutura e as propriedades físicas que caracterizam a corrente podem alterar-se caso existam condicionantes externos como é o caso do vento e da vegetação.

Assim, o principal foco desta dissertação é definir uma metodologia de análise, utilizando o modelo de turbulência LES para estudar os efeitos do vento e da vegetação na propagação de correntes de densidade. Os objetivos específicos são: (1) estudar a evolução da posição e velocidade da frente da corrente; (2) analisar o impacto do vento e do seu sentido na propagação da corrente; (3) caracterizar a influência da vegetação, quer em termos globais como em termos locais.

Na primeira parte deste estudo, analisa-se a sensibilidade da malha utilizada na simulação numérica e verifica-se a capacidade do modelo numérico com recurso aos resultados experimentais de Hacker (1996). Faz-se ainda uma comparação entre resultados obtidos com e sem superfície livre, donde se conclui que a sua presença induz uma maior mistura entre fluidos e flutuações do valor da velocidade da frente da corrente.

Em seguida, estuda-se os efeitos do vento, da sua intensidade e sentido na propagação da corrente de densidade em 2D. Observou-se que quando o vento circula no mesmo sentido da corrente e quanto maior a sua intensidade, menor a velocidade da corrente. Com o vento no sentido oposto, a velocidade da corrente aumenta com o aumento da velocidade do vento.

Na parte final, analisou-se o comportamento da corrente quando exposta a pouca densidade de vegetação, representada na simulação 3D por um único cilindro centrado com o canal. Com uma fração volúmica de 0,2%, constatou-se que o cilindro tem influência essencialmente a nível local (próximo do cilindro).

Palavras-chave: LES; Correntes de densidade; Vento; Vegetação; Superfície livre; Modelação numérica.

ABSTRACT

In transition zones from shallow lakes to wetlands or large water bodies, there are often significant variations in temperature, differences in water salinity and/or the existence of deposited sediments. These variations induce differences in the density of the water that can cause density currents. However, this structure and its physical properties can change if external conditions exist, such as wind and vegetation.

Therefore the main focus of this dissertation is to create an analysis methodology, using the LES turbulence model to study the effects of wind and vegetation on the propagation of density currents. The specific objectives are: (1) to study the evolution of the current front speed, when wind and vegetation are involved; (2) to analyze the impact of the wind and its direction on the propagation of the current; (3) to characterize the influence of vegetation, both globally and locally.

In the first part of this study, the sensitivity of the used mesh in the numerical simulation is analyzed and the capacity of the numerical model is verified using the experimental results of Hacker (1996). A comparison is made between results obtained with and without the use of a free surface, concluding that its presence induces a greater mixture between fluids and fluctuations in the speed of the front of the current, proving the need to study the effects of the wind.

Afterwards, the effects of the wind, of its intensity and direction on the propagation of the density current in 2D are studied. It was observed that when the wind runs in the same direction as the current and the greater its intensity, the lower the front speed of the current. With the wind in the opposite direction, the current front speed increases with increasing wind speed.

In the final part, we analyzed the behaviour of the current when exposed to low vegetation density, represented in the 3D simulation by a single cylinder centered with the channel. With a volume fraction of 0.2%, it was found that the impacts of the cylinder were only relevant at a local level (near the cylinder).

Keywords: LES; Density current; Wind; Vegetation; Free surface; Numeric modeling.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xix
Símbolos e Siglas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do trabalho	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Correntes de densidade	7
2.1.1 Fase de aceleração	9
2.1.2 Fase de queda - <i>Slumping Phase</i>	9
2.1.3 Fase inercial e fase viscosa	10
2.2 Rugosidade do fundo e troca de massa entre a corrente e o fluido ambiente	11
2.3 Interação vegetação-correntes de densidade	11
2.4 Efeito do vento na propagação das correntes de densidade	15
2.5 Interação do vento e da vegetação em correntes de densidade	17
3 Modelo numérico e Códigos de Análise dos Resultados	19
3.1 Equações governativas	19
3.1.1 Equação da continuidade	19
3.1.2 Equação de balanço de quantidade movimento	19
3.1.3 Equação de transporte de massa volúmica	20
3.2 Modelo de turbulência	20
3.3 <i>Solver</i>	23
3.4 Técnica VOF (<i>Volume-of-Fluid</i>)	23
3.5 Método dos volumes finitos	24
3.6 Esquemas de resolução numérica	25
3.6.1 Esquemas temporais	25

3.6.2	Esquemas de resolução de gradientes	25
3.6.3	Esquemas de resolução de divergentes	26
3.6.4	Esquemas Laplacianos	26
3.7	Controlo de solução e algoritmos	26
4	Verificação e Testes do Modelo Numérico	29
4.1	Análise de sensibilidade da malha	29
4.2	Verificação do modelo numérico	32
4.2.1	Comparação entre resultados com e sem superfície livre	37
4.3	Resolução da malha perto da parede	43
4.4	Códigos utilizados em pós-processamento	45
5	Testes numéricos 2D e 3D e análise de resultados	47
5.1	Descrição dos testes numéricos	47
5.2	Teste 2D com efeito do vento e sem vegetação	49
5.2.1	Preparação das simulações	49
5.2.2	Resultados e discussão	50
5.3	Teste 3D com cilindro isolado sem o efeito do vento	60
5.3.1	Preparação da simulação	60
5.3.2	Resultados e Discussão	61
6	Síntese da Investigação e Conclusões	71
6.1	Síntese da investigação	71
6.2	Conclusões	72
6.3	Sugestões para trabalhos futuros	73
	Bibliografia	75
A	Códigos matlab	79
B	Códigos OpenFOAM	83
C	Árvore de diretorias de uma simulação em OpenFOAM	85
D	Código adaptado para utilização do modelo de turbulência LES para o <i>solver</i> <i>interMixingFoam</i>	87

LISTA DE FIGURAS

1.1	Geometria inicial do problema.	3
1.2	Organização da pasta partilhada.	4
2.1	Diferentes fases do desenvolvimento de uma corrente de densidade.	8
2.2	Domínio utilizado no estudo da velocidade de frente da corrente na fase de aceleração. Retirada de [8].	9
2.3	Velocidade de frente da corrente adimensionalizada durante a fase de aceleração em função da distância percorrida. SP, <i>small release</i> ; LP, <i>large release</i> ; C, <i>cylindrical</i> . Retirada de [8].	10
2.4	Velocidade de frente da corrente adimensionalizada durante a fase de queda em função do tempo. Inclui também previsões teóricas. Adaptada de [8]. . .	10
2.5	Representação de um LEP em que o fluido denso ocupa a profundidade completa e metade do comprimento do canal. Note-se ainda a presença do meio poroso constituído pelos cilindros. Retirada de [39].	12
2.6	Distribuição da concentração para $Re=15000$. (a) $\phi = 0\%$; (b) $\phi = 1,25\%$; (c) $\phi = 5\%$; (d) $\phi = 12\%$. Retirada de [39].	13
2.7	Esquema do domínio utilizado em [53]. (a) Vista principal; (b) Vista de planta; (c) Vista de planta de uma montagem secundária utilizada. Adaptada de [53].	14
2.8	Visualização esquemática dos diferentes tipos de regimes identificados por [53]: (a) sem obstáculos; (b) <i>Through-flow</i> ; (c,d) <i>Over-flow</i> . (e) <i>Plunging-flow</i> ; (f) <i>Skimming-flow</i> . Retirada de [53].	15
2.9	Domínio convencional utilizado para estudar o efeito da tensão de corte provocada pelo vento nas transições de lagos para oceanos. Retirada de [12]. . .	16
2.10	Contornos de velocidade observados em $z = 0$ (relativamente ao eixo definido na Figura 2.9). O eixo temporal representa ciclos do vento. Retirada de [12]. .	16
2.11	Domínio utilizado para estudos do efeito simultâneo da tensão de corte provocada pelo vento e da vegetação nas transições de lagos para oceanos. Retirada de [29].	17

2.12	Contornos de velocidade à superfície: (a) $\phi = 0\%$, $\Gamma_{cri} = 0$; (b) $\phi = 0,22\%$, $\Gamma_{cri} = 0$; (c) $\phi = 0\%$, $\Gamma_{cri} = -0,005$; (d) $\phi = 0,22\%$, $\Gamma_{cri} = -0,005$. A linha a cheio representa velocidade 0. O sinal mais e menos representam o sentido da velocidade (para fora da costa ou em direção à costa, respetivamente. O eixo temporal representa ciclos do vento. Retirada de [29].	18
3.1	Escoamento sobre um degrau direcionado segundo o escoamento obtido por: (a) DNS; (b) LES; (c) RANS. Retirada de [52].	22
3.2	Exemplo simplificado da utilização da técnica VOF. Adaptada de [52].	24
3.3	Volumes de controlo associados ao método FVM <i>cell-centered</i> e <i>vertex-centered</i> Adaptado de [13].	24
3.4	Disposição dos elementos e variáveis utilizadas na descrição do esquema de resolução de gradientes.	25
3.5	Fluxograma descritivo do algoritmo PIMPLE	27
4.1	Evolução da corrente de densidade: comparação da experiência 2 de [17] (esquerda) e da simulação 2D LES para a malha B. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$	30
4.2	Evolução da corrente de densidade: comparação da experiência 2 de [17] (esquerda) e da simulação 2D LES para a malha C. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$	30
4.3	Evolução da corrente de densidade: comparação da experiência 2 de [17] (esquerda) e da simulação 2D LES para a malha D. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$	31
4.4	Evolução da corrente de densidade: comparação da simulação 2D LES malha A e da simulação 2D LES para a malha D. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$	31
4.5	Evolução da posição da frente da corrente para a malha A (435x63), malha B (870x125), malha C (1392x200) e malha D (1740x250) e resultados experimentais obtidos por [17] para a experiência 2.	32
4.6	Evolução da corrente de densidade. Experiência 1 de [17]. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,47$; (b) $l = 1,33$; (c) $l = 2,20$; (d) $l = 3,1$. A escala representa distâncias adimensionais com x_0	33

4.7	Evolução da corrente de densidade. Experiência 2 de [17]. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,6$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,1$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$. A escala representa distâncias adimensionais com x_0	34
4.8	Evolução da corrente de densidade. Experiência 3 de [17]. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 1,33$; (b) $l = 2,17$; (c) $l = 3,00$; (d) $l = 3,73$; (e) $l = 4,53$; (f) $l = 5,27$; (g) $l = 6,8$; (h) $l = 8,13$. A escala representa distâncias adimensionais com x_0	35
4.9	Evolução temporal da posição da frente da corrente obtida numericamente da experiência 1 e comparação com resultados experimentais de [17].	36
4.10	Evolução temporal da posição da frente da corrente obtida numericamente para a experiência 3 e comparação com resultados experimentais de [17]. . .	36
4.11	Estrutura da corrente observada com fluido denso representada a preto. a) $t = 1s$; b) $t = 2s$; c) $t = 4s$; d) $t = 8s$; e) $t = 15s$. Em cima os resultados da simulação 1 e em baixo os da simulação 2.	38
4.12	Corrente de densidade completamente desenvolvida para simulação 1 (em cima) e simulação 2 (em baixo). Altura y e comprimento x em metros. a) $t = 25s$; b) $t = 30s$	39
4.13	Evolução temporal da posição da frente da corrente para a simulação 1 e para a simulação 2.	40
4.14	Evolução temporal da velocidade da frente da corrente para a simulação 1 e para a simulação 2	41
4.15	Perfis de velocidade na direção de propagação da corrente e na direção perpendicular a esta em vários instantes de tempo, numa mesma zona da frente da corrente: a) $t = 4s$; b) $t = 8s$; c) $t = 10s$; d) $t = 15s$; e) $t = 25s$; f) $t = 30s$	42
4.16	Perfis de magnitude de vorticidade em vários instantes de tempo, numa mesma zona da frente da corrente: a) $t = 4s$; b) $t = 8s$; c) $t = 15s$; d) $t = 25s$	43
4.17	Valores de y^+ obtidos para a simulação: com superfície livre (a); sem superfície livre (b).	44
5.1	Esquema do domínio numérico 2D utilizado para o teste com efeito do vento sem vegetação.	49
5.2	Estrutura da corrente de densidade com superfície livre sem efeito do vento (em cima) e com efeito do vento a 6,67 m/s (em baixo) na direção da propagação da corrente em vários instantes no tempo: a) $t = 1s$; b) $t = 2s$; c) $t = 4s$; d) $t = 8s$; e) $t = 15s$	50
5.3	Corrente de densidade completamente desenvolvida para a simulação com superfície livre sem vento (em cima) e simulação B (em baixo). a) $t = 25s$; b) $t = 30s$	51

5.4	Estrutura da corrente de densidade da simulação B (em cima) e da simulação A (em baixo) na direção da propagação da corrente e em vários instantes no tempo: a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.	52
5.5	Corrente de densidade completamente desenvolvida para a simulação B (em cima) e A (em baixo). a) $t = 25$ s; b) $t = 30$ s.	52
5.6	Estrutura da corrente de densidade da simulação B (em cima) e da simulação C (em baixo) na direção da propagação da corrente e em vários instantes no tempo: a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.	53
5.7	Estrutura da corrente de densidade da simulação C. a) $t = 20$ s; b) $t = 25$ s. . . .	53
5.8	Estrutura da corrente de densidade da simulação D. a) $t = 8$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 15$ s; d) $t = 25$ s.	54
5.9	Evolução da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento com sentido da corrente de densidade.	55
5.10	Evolução da velocidade da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento com sentido da corrente de densidade.	56
5.11	Estrutura da corrente de densidade com superfície livre (em cima) e em regime contra-corrente (em baixo). a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.	57
5.12	Estrutura da corrente de densidade da simulação B em regime corrente (em cima) e em regime contra-corrente (em baixo). a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.	58
5.13	Estrutura da corrente de densidade completamente desenvolvida da simulação B em regime corrente (em cima) e em regime contra-corrente (em baixo). a) $t = 25$ s; b) $t = 30$ s.	58
5.14	Evolução da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento em regime de contra-corrente.	59
5.15	Evolução da velocidade da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento em regime de contra-corrente.	59
5.16	Evolução do número de Froude em função da velocidade transmitida pelo vento à superfície da água.	60
5.17	Esquema do domínio numérico utilizado para o teste do cilindro isolado. . . .	61
5.18	Vista lateral da estrutura da corrente observada com fluido denso representado a preto. a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s; f) $t = 20$ s.	62
5.19	Vista de corte da estrutura da corrente observada com fluido denso representado a preto. a) $t = 4$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 10$ s; d) $t = 12$ s; e) $t = 15$ s; f) $t = 20$ s.	63
5.20	Vista em perspectiva da estrutura da corrente observada com fluido denso representado a preto. a) $t = 5$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 9$ s; d) $t = 15$ s; e) $t = 20$ s. . . .	64
5.21	Evolução temporal da posição da frente da corrente da simulação 3D com cilindro e comparação com a simulação 2D sem cilindro.	65

5.22	Evolução temporal da velocidade da frente da corrente da simulação 3D com cilindro.	65
5.23	Perfis de velocidade na direção de propagação da corrente e na direção perpendicular a esta em vários instantes de tempo, na zona da frente da corrente: a) $t = 4$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 15$ s; d) $t = 20$ s.	66
5.24	Perfis de velocidade na direção da largura do canal em vários instantes de tempo, na zona da frente da corrente: a) $t = 9,4$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 12$ s; d) $t = 15$ s.	67
5.25	Perfis de magnitude de vorticidade em vários instantes de tempo, na mesma zona da frente da corrente: a) $t = 4$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 10$ s; d) $t = 12$ s; e) $t = 15$ s.	68
5.26	Perfil de velocidade na direção da largura do canal aos 12 segundos medido a uma altura de 20% da altura do canal a uma distância de 62 centímetros do final do reservatório de fluido denso.	69
5.27	Força e coeficiente de arrasto no cilindro.	69
A.1	Código Matlab para filtrar os dados da posição da frente de corrente sem o efeito do vento.	79
A.2	Código Matlab para filtrar os dados da velocidade da frente de corrente sem o efeito do vento.	80
A.3	Código Matlab para filtrar os dados da velocidade da frente de corrente com efeito do vento.	80
A.4	Código Matlab para filtrar os dados da velocidade da frente de corrente com efeito do vento.	81
B.1	Código OpenFOAM para obtenção dos dados relativos à posição da frente de corrente.	83
B.2	Código OpenFOAM para obtenção dos dados relativos à velocidade da frente de corrente.	84
B.3	Código OpenFOAM para obtenção dos dados relativos aos perfis de velocidade.	84
C.1	Diagrama de diretorias em árvore sobre a organização de pastas e ficheiros usados para uma simulação em OpenFOAM.	86
D.1	Código adaptado para utilização do modelo de turbulência LES para o <i>solver interMixingFoam</i>	87

LISTA DE TABELAS

4.1	Malhas utilizadas no estudo de dependência da malha.	29
4.2	Experiências realizadas por Hacker (1996)	33
4.3	Números de Froude e comparação com resultados de Hacker (1996)	35
4.4	Adimensionalização das variáveis utilizadas.	37
5.1	Número de testes numéricos possíveis a realizar no âmbito do projeto <i>WinTherface</i>	48
5.2	Valores de velocidade utilizadas nas simulações com efeito do vento.	49
5.3	Números de Froude resultantes de várias velocidades de vento no sentido da corrente de densidade.	55
5.4	Números de Froude resultantes de várias velocidades de vento em regime de contra-corrente.	57
5.5	Testes possíveis para o caso de cilindro isolado sem ação do vento	61

SÍMBOLOS E SIGLAS

$\Delta\rho$	Diferença entre as massas volúmicas dos dois fluidos ($M \cdot L^{-3}$).
ϕ	Fração volúmica dos cilindros (%).
μ	Viscosidade dinâmica ($M \cdot L^{-2} \cdot T$).
ρ_0	Densidade do fluido mais denso ($M \cdot L^{-3}$).
ρ_1	Densidade do fluido ambiente ($M \cdot L^{-3}$).
Γ_{cri}	Tensão de corte crítica.
τ_p	Tensão de corte da parede ($M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$).
τ_w	Tensão de corte provocada pelo vento ($M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$).
μ_x	Medida da dispersão dos cilindros na direção x.
μ_y	Medida da dispersão dos cilindros na direção y.
Δz	Altura do primeiro elemento adjacente à parede (L).
A	Área superficial do cilindro (L^2).
D	Diâmetro dos cilindros (L).
F_d	Força de arrasto ($M \cdot L \cdot T^{-2}$).
H	Profundidade do reservatório (L).
Re_D	Número de Reynolds calculado com o diâmetro do cilindro D .
Re_H	Número de Reynolds calculado com altura H .
U	Velocidade adimensional.
U_x	Velocidade adimensional segundo o eixo x.
U_y	Velocidade adimensional segundo o eixo y.
V	Velocidade do vento ($L \cdot T^{-1}$).
g	Aceleração gravítica ($L \cdot T^{-2}$).
g'	Aceleração gravítica reduzida ($L \cdot T^{-2}$).
h_f	Altura da corrente de densidade (L).
l	Distância entre o centro do cilindro e o final do reservatório de fluido denso (L).
n_v	Porosidade - rácio entre o volume ocupado por água e o volume total.
t_{ad}	Tempo adimensional.
u_τ	Velocidade associada à tensão de corte na parede ($L \cdot T^{-1}$).

u_1	Velocidade no primeiro elemento a partir da parede ($L \cdot T^{-1}$).
u_f	Velocidade da frente de onda.
u_s	Velocidade transmitida pelo vento à superfície da água ($L \cdot T^{-1}$).
x_0	Comprimento do reservatório de fluido denso (L).
x_f	Posição da frente de onda.
y^*	Variável adimensionalizada de y .
y^+	Distância da parede adimensional.
y_0	Altura do domínio (L).
z^*	Variável adimensionalizada de z .
z_0	Largura do domínio (L).
C_d	Coeficiente de arrasto.
FMV	<i>Finite volume method.</i>
LEP	<i>lock-exchange problem.</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation.</i>
R	Rácio entre a altura e comprimento de fluido denso.
SGS	<i>Sub-grid scale.</i>
SL	Superfície livre.
VOF	<i>Volume of Fluid.</i>

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do trabalho

Nas zonas de transição de lagos pouco profundos para zonas húmidas registam-se frequentemente variações significativas de temperatura, diferenças na salinidade das águas e/ou a existência de sedimentos em deposição. Estas variações induzem diferenças na massa volúmica da água que podem originar correntes de densidade. A sua existência e os processos físicos que lhes estão associados têm um papel chave no transporte de nutrientes e poluentes, afetando o estado ecológico das massas de água [48], [49].

O conhecimento da capacidade de transporte de correntes de densidade é muito importante na gestão de qualidade de água e segurança industrial. Nos processos dinâmicos, estas correntes têm influência em estruturas submersas como o caso dos gasodutos, nomeadamente devido ao carácter transitório da interação corrente de densidade-estrutura [16]. Neste sentido torna-se essencial caracterizar a dinâmica das correntes de densidade, nomeadamente as condicionantes que sustentam a estrutura do escoamento, como por exemplo: diferença de densidades do fluido, presença de vegetação, sentido e direção do vento, rugosidade das fronteiras e geometria das transições entre lagos e zonas húmidas.

Apesar das diferentes origens da diferença de densidades, as correntes de densidade, quando não existem condicionantes extraordinários, apresentam em geral uma estrutura macroscópica semelhante entre si, composta essencialmente por uma frente, o corpo e uma cauda da corrente. Na interface entre o fluido mais denso e o fluido ambiente tendem a formar-se estruturas vorticulares que são conhecidas como instabilidades de Kelvin-Helmholtz [6]. Estas instabilidades ocorrem tipicamente na interface entre dois fluidos quando existe uma diferença de velocidades entre estes.

Do ponto de vista dinâmico, a descrição detalhada das correntes de densidade apresenta enorme complexidade. Quando ocorrem interações das correntes com as fronteiras

locais (obstáculos e rugosidades), esta complexidade aumenta. Neste sentido, o estudo das correntes de densidade tem aumentado desde 1960 mas a compreensão das estruturas 3D e os parâmetros que condicionam a sua dinâmica ainda é incipiente. Na prática, grande parte dos estudos foram efetuados considerando os efeitos isolados de cada parâmetro e são muito poucos aqueles que incluem o efeito do vento. Neste sentido, pretende-se estudar numericamente o efeito do vento e da vegetação na propagação de correntes de densidade.

Esta dissertação está inserida num projecto nacional contemplado no programa Projetos de Investigação Científica e Desenvolvimento Tecnológico (IC&DT) com referência PTDC/CTA-OHR/30561/2017, designado WinTherface: Mass exchange driven by wind and temperature in lake-wetland interfaces (correntes de densidade de origem térmica e por ação do vento na interface entre lagos e zonas húmidas).

1.2 Objetivos

O objectivo principal desta dissertação é estudar numericamente o efeito do vento e da vegetação no escoamento de correntes de densidade, recorrendo ao modelo numérico LES (*large eddy simulation*). Os objetivos específicos são os seguintes:

- Estudar a evolução da velocidade da frente da corrente, quando estão envolvidas as ações do vento e da vegetação;
- Caracterizar o campo de velocidades à escala do espaçamento médio entre cilindros no plano horizontal e sua dimensão;
- Analisar o arrasto provocado pela vegetação;
- Analisar o impacto do vento e do seu sentido na propagação da corrente;
- Quantificar os efeitos da vegetação e do vento, com recurso a parâmetros adimensionais utilizados na literatura.

1.3 Metodologia

As simulações numéricas serão realizadas no *OpenFOAM* usando o modelo LES (*Large Eddy Simulation*). Os seus resultados são processados numa fase posterior com códigos desenvolvidos em *Matlab* e com recurso ao software *Paraview*. Inicialmente, as simulações não incluirão todos os elementos (vegetação e ação do vento). Na primeira fase, os resultados essencialmente com propósitos de familiarização com o software e com o código a utilizar serão obtidos através de um *solver* laminar. Assim, a intenção será começar com um caso mais simples, provocando-lhe alterações até se atingir o caso mais completo e final, isto é, onde se inclui a geometria em 3D, vegetação e o efeito do vento com velocidade e sentido variável. Como ponto de partida, será adotada uma geometria em

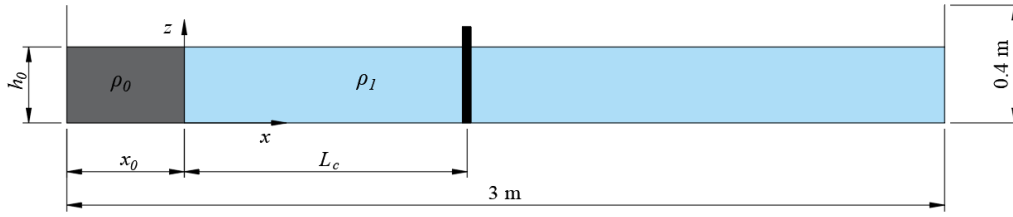


Figura 1.1: Geometria inicial do problema.

2D semelhante à utilizada em [17] para a realização da verificação do código numérico. Posteriormente, serão utilizadas dimensões adaptadas de estudos que estão a ser feitos em laboratório no âmbito do projeto *WinTherface: Mass exchange driven by wind and temperature in lake-wetland interfaces* [43, 45]. Neste primeiro caso, apenas se consideram dois volumes separados: um com fluido mais denso, e um outro com fluido ambiente. Como fluido mais denso será usado água salgada (ρ_0) e como fluido ambiente será usada água sem alterações à sua massa volúmica (ρ_1). O volume da água salgada ($170 \times 300 \times 200$ [mm³]) será muito inferior ao volume da água sem alterações ($170 \times 2700 \times 200$ [mm³]). O canal onde decorrerá o escoamento tem 170 mm de largura, 400 mm de altura e 3000 mm de comprimento. Apresenta-se então na Figura 1.1 o esquema do canal.

A geração da malha será feita usando o *DesignModeler*. Os resultados são validados com os estudos realizados por [43, 45].

De modo a facilitar a troca de informação entre algumas partes integrantes do projeto *WinTherface*, foi criada uma pasta partilhada na base de dados, organizada como mostra a Figura 1.2.

A verificação do código será dividida em duas etapas, uma análise de sensibilidade da malha e uma comparação de resultados com os resultados experimentais de [17]. Para a análise de sensibilidade, serão utilizadas quatro malhas com diferentes graus de refinamento. Para a comparação com os resultados experimentais, serão feitas simulações com os vários rácios utilizados por Hacker, que dizem respeito à experiência 1, 2 e 3 explicados em [17]. A organização dos resultados do capítulo 5 passa por dividir a modelação nos vários sub-capítulos apresentados na Figura 1.2, com um caso 2D sem cilindro, apenas com efeito do vento.

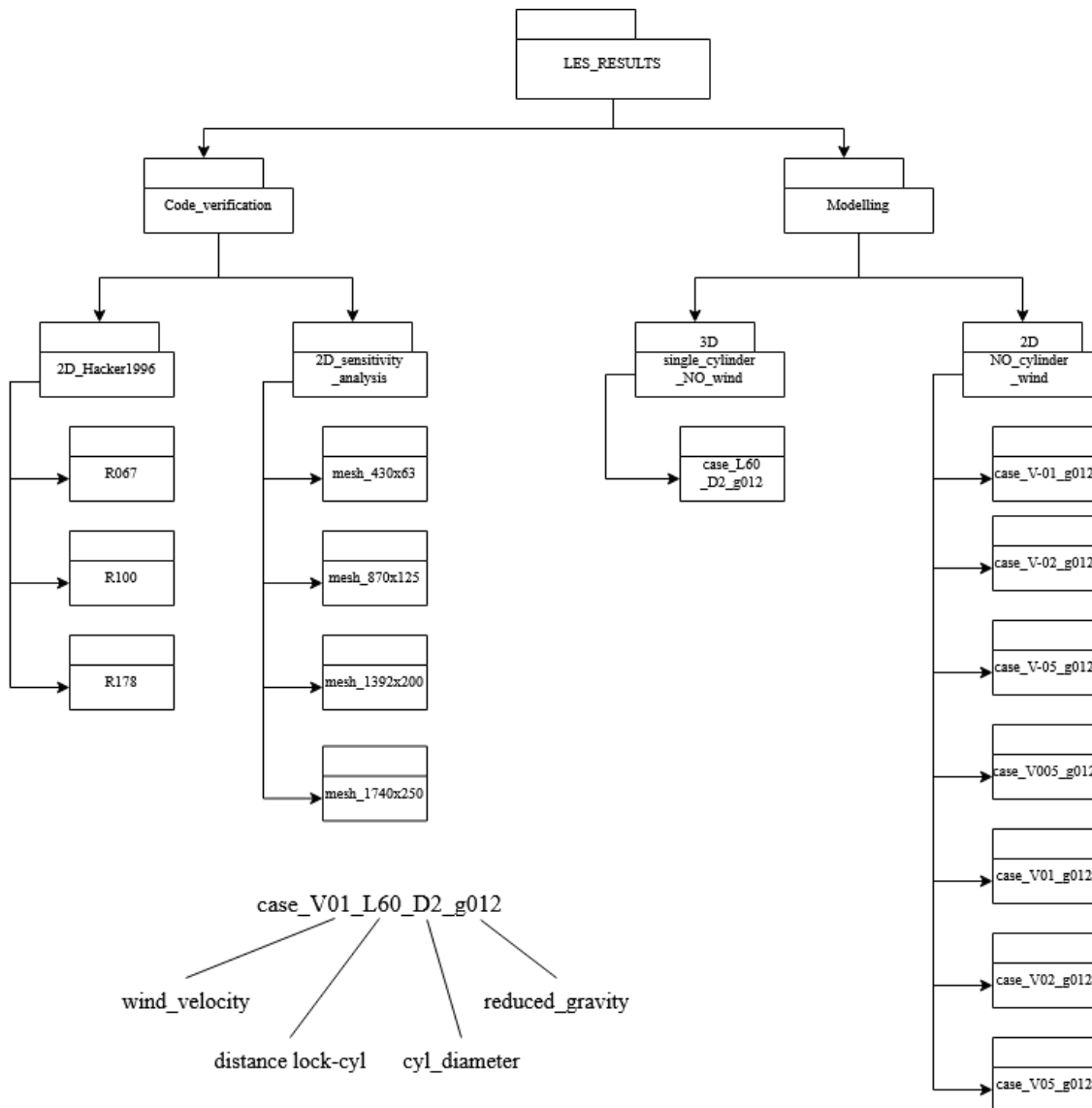


Figura 1.2: Organização da pasta partilhada.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em seis capítulos. Logicamente, a estrutura apresentada procura descrever de uma forma intuitiva os objetivos e a metodologia definidos na Secção 1.2 e 1.3:

1. Introdução - envolve um sub-capítulo de enquadramento do trabalho, objetivos, metodologias da tese, bem como a presente estrutura da dissertação;
2. Revisão bibliográfica - apresenta uma análise do conhecimento existente sobre o desenvolvimento de correntes de densidade. Este capítulo será dividido em vários sub-capítulos começando por tratar de aspetos gerais como a estrutura do escoamento

e as diversas fases que a compõem. Nos últimos sub-capítulos serão analisados trabalhos convenientes que tratam do efeito da vegetação e do vento em correntes de densidade:

- Correntes de densidade
 - Fase de aceleração
 - Fase de queda - *Slumping phase*
 - Fase inercial e viscosa
 - Rugosidade do fundo e troca de massa entre a corrente e o fluido
 - Interação vegetação-correntes de densidade
 - Interação do vento com correntes de densidade
 - Interação do vento e da vegetação com correntes de densidade
3. Modelo numérico - envolve a descrição do modelo numérico e os aspetos computacionais envolvidos na simulação;
 4. Verificação e testes do modelo numérico - trata de analisar a sensibilidade dos resultados face ao refinamento da malha e verificar a fiabilidade do modelo numérico, comparando resultados numéricos com resultados experimentais já feitos por [17];
 5. Testes numéricos 2D e 3D e análise de resultados - estuda em 2D o efeito do sentido e velocidade do vento no escoamento de correntes de densidade; a influência isolada de pouca vegetação (cilindro único) é estudada em 3D. Este capítulo está organizado da seguinte forma:
 - Descrição dos testes numéricos
 - Testes 2D com efeito do vento sem vegetação
 - Testes 3D com cilindro isolado sem vento
 6. Síntese da Investigação e Conclusões - sumariza os principais resultados da dissertação e faz recomendações para futuros trabalhos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Correntes de densidade

Os estudos das correntes de densidade tiveram início na década de 1960 [2]. Estes estudos tiveram como objetivo analisar a formação e as características das correntes, utilizando reservatórios retangulares e uma barreira vertical, com dois fluidos de densidades diferentes em cada reservatório. A barreira é então retirada e o escoamento é deixado desenvolver. Esta experiência é tipicamente designada na literatura por *lock-exchange problem* (LEP). Em estudos como por exemplo [2], é dado grande ênfase à montagem experimental e ao método utilizado. Uma distinção das várias fases de propagação de uma corrente de densidade simples foi feita em [23]. Distinguem-se três fases principais: uma fase de aceleração; uma fase de queda denominada na literatura por *slumping phase*; seguida de uma fase inercial (*inertial phase*), como se mostra na Figura 2.1. Existe também uma fase já não tão característica do escoamento mas que tem o nome de fase viscosa (*viscous phase*). No problema típico de LEP, enquanto a frente da corrente se desloca horizontalmente, forma-se uma perturbação com sentido oposto. Após refletir na parede a montante, esta perturbação (mais rápida) acaba por alcançar a frente da corrente, afetando o caráter constante da velocidade. Rottman & Simpson [41] observaram que este momento marca a transição da fase de queda para a fase inercial. Posteriormente, as forças de impulsão acabam por igualar as forças viscosas e inicia-se assim a fase viscosa.

A necessidade de prever o tempo de desenvolvimento de uma corrente de densidade bem como da distância que esta atinge é algo que tem motivado o desenvolvimento de vários estudos analíticos, experimentais e numéricos [8]. A primeira tentativa analítica de estimar a velocidade média do escoamento foi feita em 1940 por *von-Karmán* com recurso à teoria de escoamento potencial (referido em [22]). Os resultados mostram que o fluido denso desloca-se em contacto com o fluido ambiente com uma velocidade média dada

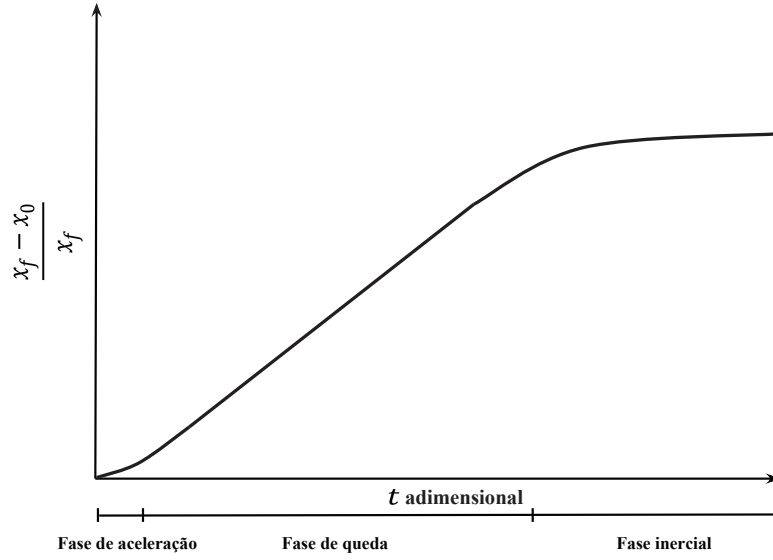


Figura 2.1: Diferentes fases do desenvolvimento de uma corrente de densidade.

pela Equação 2.1, onde a gravidade reduzida é dada pela Equação 2.2 e h_F é a espessura da corrente.

$$u_F = \sqrt{2g'h_F} \quad (2.1)$$

$$g' = \frac{g(\rho_1 - \rho_0)}{\rho_0} \quad (2.2)$$

Mais recentemente, no que diz respeito à geometria e ao domínio, têm sido utilizadas algumas variações nos estudos numéricos: com simulações apenas em 2D (2 dimensões considerando apenas o plano vertical) [9] e [37], ainda que com métodos de resolução numérica diferentes; simulações apenas em 3D [25]; simulações comparando resultados 2D e 3D [4]; utilizando domínios que permitissem o estudo do efeito de inclinações e curvaturas do canal [9, 30], rugosidade do fundo [28].

Diferentes modelos numéricos têm sido utilizados para simular correntes de densidade, como por exemplo: as equações de águas rasas [1], RANS, com modelo de turbulência $k - \epsilon$ [21], [24], DNS e LES [7], [8], [18], [34], [35], [37] e [38]. O modelo LES resolve as grandes escalas diretamente como o DNS e modela as pequenas escalas, sendo assim mais preciso que o RANS e menos exigente computacionalmente que o DNS. Assim, o LES considera-se ser a abordagem mais eficiente para as simulações de escoamentos turbulentos com caráter transitório como é o caso de correntes de densidade. Existe também a possibilidade de se utilizar o modelo u-RANS, que permite simular este tipo de escoamento. No entanto, este tem alguns problemas relacionados com a precisão, uma vez que faz a modelação de toda a escala turbulenta.

Experimentalmente, foram desenvolvidos trabalhos desde cedo por Schmidt em 1911, por von-Karmán em 1940 (referido por [15] e por [26]) que libertou volumes de água salgada em cursos de água doce, documentando as suas observações sobre a frente da

corrente. A evolução desta corrente como sendo função temporal, foi estudada experimentalmente em [31], [32] e [23]. Revisões do trabalho experimental desenvolvido nesta área foram feitos por [33] e por [27].

2.1.1 Fase de aceleração

Após ser retirada a barreira vertical que separa os fluidos de densidades diferentes, que se traduz numa abertura física nos casos experimentais, a corrente de densidade acelera e atinge a velocidade máxima da frente da corrente. Após este máximo, existe uma pequena desaceleração até a velocidade permanecer constante (aceleração nula). [8] estudaram numericamente o comportamento desta fase para simulações 2D e 3D para o domínio apresentado na Figura 2.2. Para ambos os casos 2D e 3D, os resultados aparentam ser idênticos.

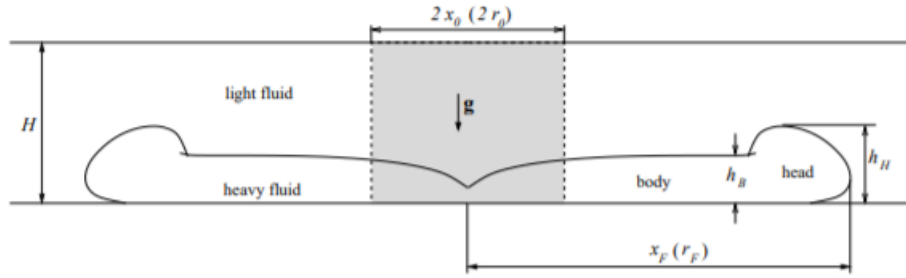


Figura 2.2: Domínio utilizado no estudo da velocidade de frente da corrente na fase de aceleração. Retirada de [8].

A Figura 2.3 mostra a velocidade da frente da corrente em função da distância percorrida pela corrente para diferentes valores de Reynolds. É possível observar a diferença entre pequenas e grandes descargas, a diferença entre o escoamento ser cilíndrico (neste caso não se verifica a velocidade constante) e não plano e uma comparação com resultados teóricos de [3] e [42]. É de realçar que para todos os casos a velocidade máxima foi atingida para $\bar{x}_F - \bar{x}_0 \approx 0,33$ (distância adimensionalizada com x_0).

2.1.2 Fase de queda - *Slumping Phase*

A velocidade de frente da corrente torna-se constante após o período de aceleração que é designado de fase de queda. [8] observaram que esta velocidade não depende do volume de fluido denso e que aproximações em 2D refletem de forma precisa esta velocidade média. Também observaram que a variação do rácio entre a altura e o comprimento do reservatório altera a estrutura do escoamento mas não a velocidade da frente da corrente. Na Figura 2.4 estão os resultados obtidos para três valores diferentes de Reynolds [8].

Observa-se que para $Re=8950$, a velocidade é constante para $3 < \tilde{t} < 12$ (\tilde{t} adimensionalizado multiplicando t por $\frac{\sqrt{Hg'}}{x_0}$), com um valor de aproximadamente 0,4 (ligeiramente

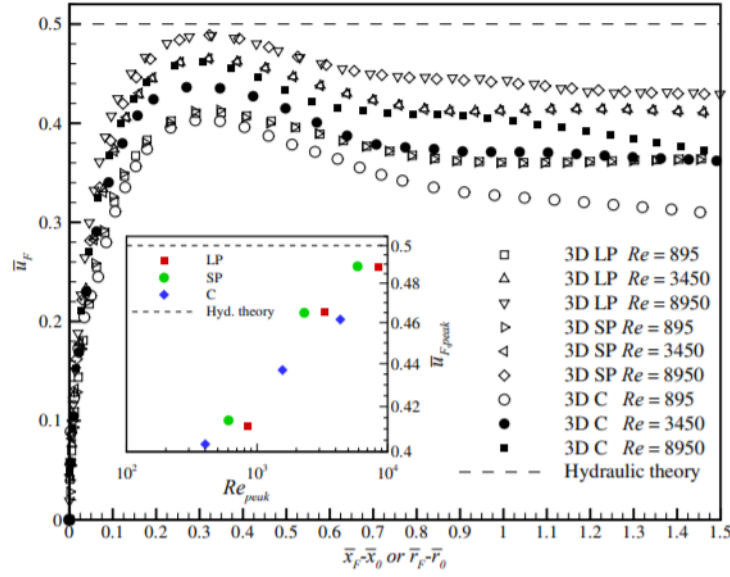


Figura 2.3: Velocidade de frente da corrente adimensionalizada durante a fase de aceleração em função da distância percorrida. SP, *small release*; LP, *large release*; C, *cylindrical*. Retirada de [8].

inferior ao valor teórico de $\frac{1}{2}$ registrado em [23]. A posição correspondente está localizada no intervalo $1 < \bar{x}_F - \bar{x}_0 < 5$, i.e., 5 vezes o comprimento da zona com fluido denso.

2.1.3 Fase inercial e fase viscosa

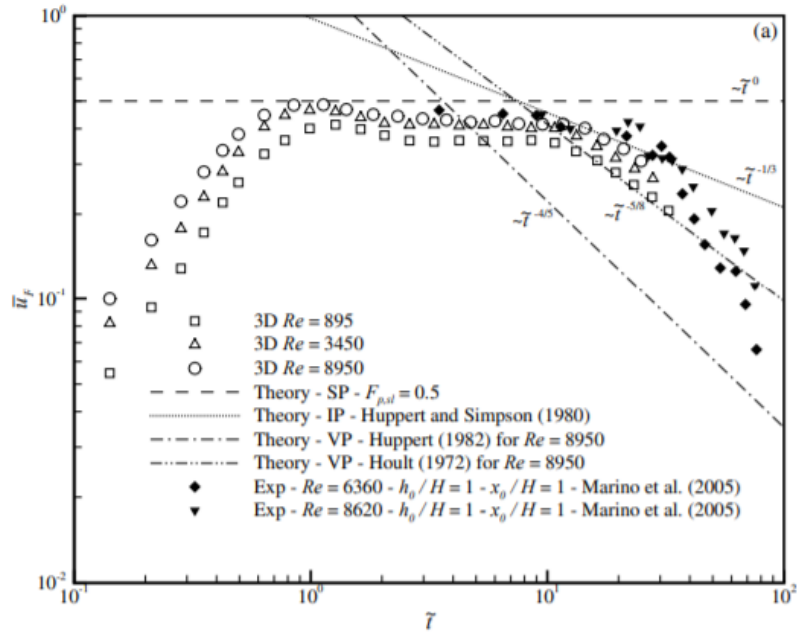


Figura 2.4: Velocidade de frente da corrente adimensionalizada durante a fase de queda em função do tempo. Inclui também previsões teóricas. Adaptada de [8].

Nota-se também na Figura 2.4 a velocidade da frente a decair segundo uma lei teórica de previsões da fase viscosa para $Re=3450$. Neste caso, o escoamento transita da fase de queda diretamente para fase viscosa. Para $Re=8950$ a velocidade da frente da corrente segue uma lei da fase inercial proposta por [23] até $\tilde{t} \approx 17$. Após este período de tempo, nota-se um decaimento mais rápido seguindo as previsões para a fase viscosa. No entanto, estas previsões aproximam todos os resultados por defeito.

2.2 Rugosidade do fundo e troca de massa entre a corrente e o fluido ambiente

A descrição da propagação da corrente de densidade apresentada anteriormente foi feita sem ter em conta os efeitos das fronteiras. Quando ocorrem interações das correntes com as fronteiras locais, a complexidade da estrutura do escoamento aumenta. Para compreender os efeitos destas fronteiras vários estudos foram realizados.

[28] estudaram o efeito da rugosidade do fundo e identificaram duas fases do escoamento: a primeira onde a velocidade da frente aumenta e uma segunda, onde diminui. Observaram também que a presença de rugosidade do fundo atenua as diferenças entre os resultados experimentais e numéricos durante a primeira fase do escoamento.

A troca de massa entre a corrente de densidade e o fluido ambiente tem sido também alvo de estudo ao longo dos anos, sendo referido na literatura como *entrainment*. [17] estudaram experimentalmente este assunto e mostraram que o efeito de mistura entre os dois fluidos acontece maioritariamente nas fases iniciais do escoamento, o que leva a uma estrutura geralmente complexa. [19] observaram uma conclusão interessante que é refletida nos modelos teóricos, afirmando que a frente da corrente permanece essencialmente intacta durante a fase de queda, isto é, a mistura é negligenciável nesta fase, quando comparada com a fase de aceleração. [1] estudaram este fenómeno experimental e numericamente, verificando uma boa concordância entre os resultados. No entanto, quando comparado com estudos anteriores utilizando modelos de águas rasas, o modelo utilizado em [1] revelou produzir melhores resultados.

2.3 Interação vegetação-correntes de densidade

Para além de estudos feitos sobre correntes de densidade em canais com várias formas como os casos de LEP, tem sido de grande interesse estudar também uma aproximação mais realista ao que se encontra na natureza, que é a existência de obstáculos no escoamento. Este efeito é representado por exemplo por barreiras físicas em avalanches de neve ou quando correntes de gravidade encontram zonas de elevada densidade de vegetação ou gasodutos. Esta obstrução ao escoamento tem efeitos essencialmente no arrasto e na velocidade da frente da corrente.

[39] estudaram o efeito numericamente utilizando um domínio constituído por um meio poroso caracterizado pela existência de cilindros horizontais com eixo perpendicular à direção da propagação da corrente de densidade, como apresentada na Figura 2.5. A simulação é iniciada como se de um LEP se tratasse.

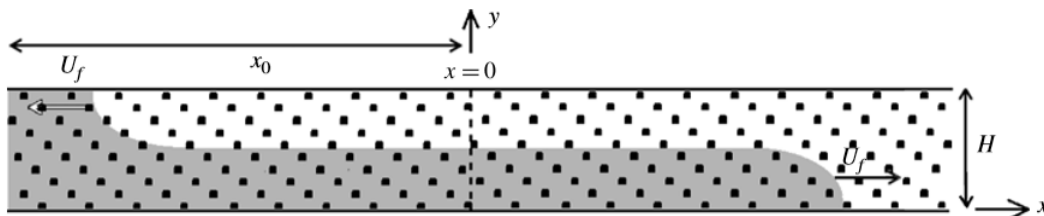


Figura 2.5: Representação de um LEP em que o fluido denso ocupa a profundidade completa e metade do comprimento do canal. Note-se ainda a presença do meio poroso constituído pelos cilindros. Retirada de [39].

Como referida, num LEP a corrente de densidade entra numa fase de aceleração até atingir uma fase de queda (*slumping phase*) onde se verifica velocidade constante. Este estado permanece até a frente da corrente ser afetada por reflexões de perturbações nas paredes [41]. Quando se considera meios porosos com volume suficiente de obstáculos, o arrasto adicional induz uma desaceleração do fluido, iniciando assim uma fase dominada pelas forças exercidas pelos obstáculos. [10] também estudou o escoamento de correntes de densidade com uma rede de obstáculos horizontais e observou que para valores de Reynolds (relativos aos cilindros) baixos, o escoamento é controlado por efeitos viscosos em que a velocidade da frente da corrente varia com $t^{-\frac{1}{2}}$. Quando os valores de Reynolds são elevados, o comportamento da interface entre os dois fluidos é diferente e a velocidade da frente da corrente varia com $t^{-\frac{1}{4}}$ [39].

[39] apresenta os efeitos que as características dos obstáculos, nomeadamente densidade volumétrica (relação entre o volume ocupado por obstáculos e o volume total) e dimensão, têm no escoamento. Na Figura 2.6 apresenta-se os resultados obtidos para a variação da densidade/quantidade de obstáculos, ϕ . É notável que a interação do escoamento com uma maior quantidade de obstáculos reduz a dimensão e coesão dos vórtices de *Kelvin-Helmholtz* e aumenta o grau de mistura na frente da corrente, o que explica as diferenças na distribuição de concentrações.

Considerando a dimensão dos cilindros variável e mantendo constante a sua densidade no domínio, [39] verificaram que ao aumentar a dimensão dos obstáculos provoca o aumento do grau de mistura do escoamento e reduz a intensidade dos vórtices. Casos idênticos com obstáculos flutuantes foram estudados experimentalmente por [50] e obtiveram conclusões semelhantes aos casos com vegetação submersa e apoiada no fundo.

Para os propósitos desta dissertação, é interessante averiguar também os casos estudados de interação com vegetação, quando esta é disposta verticalmente e assente no fundo. [53] abordou esta configuração considerando a dimensão dos obstáculos como variável

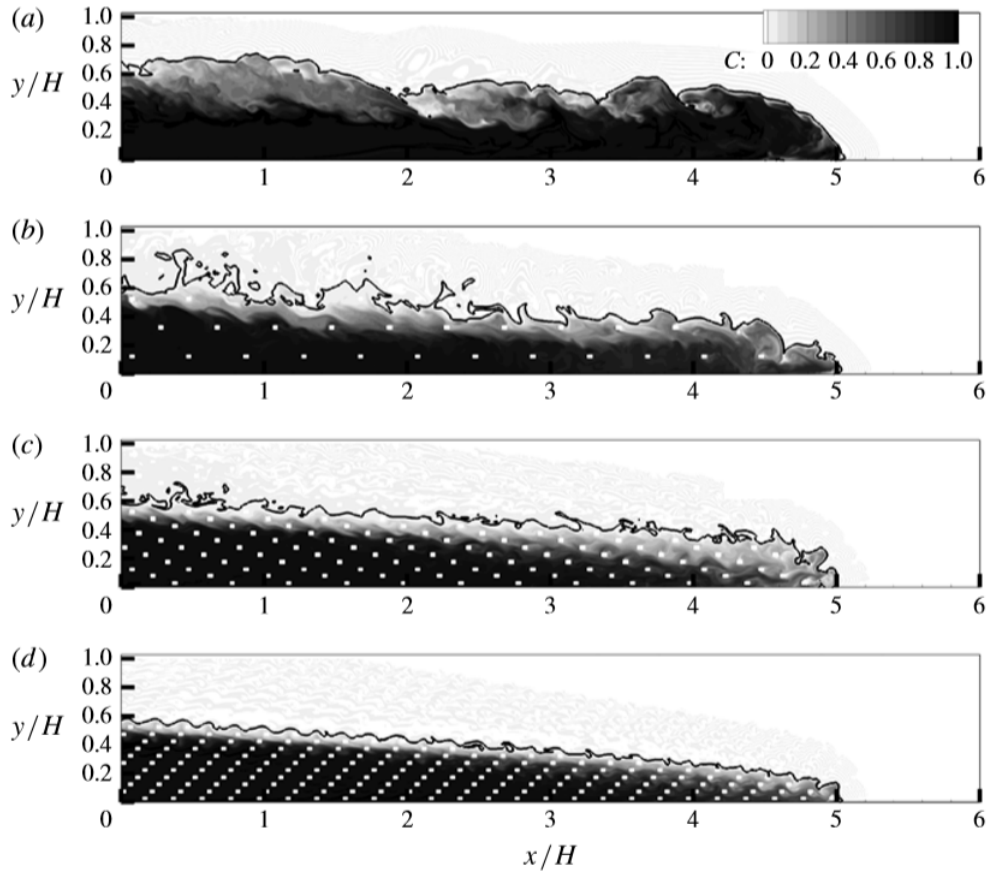


Figura 2.6: Distribuição da concentração para $Re=15000$. (a) $\phi = 0\%$; (b) $\phi = 1,25\%$; (c) $\phi = 5\%$; (d) $\phi = 12\%$. Retirada de [39].

fixa, variando apenas a sua densidade no domínio, ϕ . A disposição dos elementos utilizados por [53] encontram-se na Figura 2.7. Este parâmetro pode ser definido de forma convencional como em [46] ou utilizando uma decomposição nas duas direções em que o escoamento se desenvolve, x e y (comprimento e profundidade) como feito em [53] e indicado na Equação 2.3, 2.4 e 2.5.

$$\phi = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_x \mu_y \quad (2.3)$$

$$\mu_x = d/s_x \quad (2.4)$$

$$\mu_y = d/s_y \quad (2.5)$$

Todos os parâmetros das equações acima estão descritos na Figura 2.7. Para o caso com vegetação fixa no fundo, é possível obter vários tipos de regime em função da diferença da combinação de μ_x e de μ_y [53]:

- *Through-flow* \rightarrow casos com μ_y pequeno e a corrente propaga-se ao longo dos vazios entre obstáculos (*through-nose* [TN]). A esteira de cada cilindro atua como dissipador de turbulência (Figura 2.8 b).

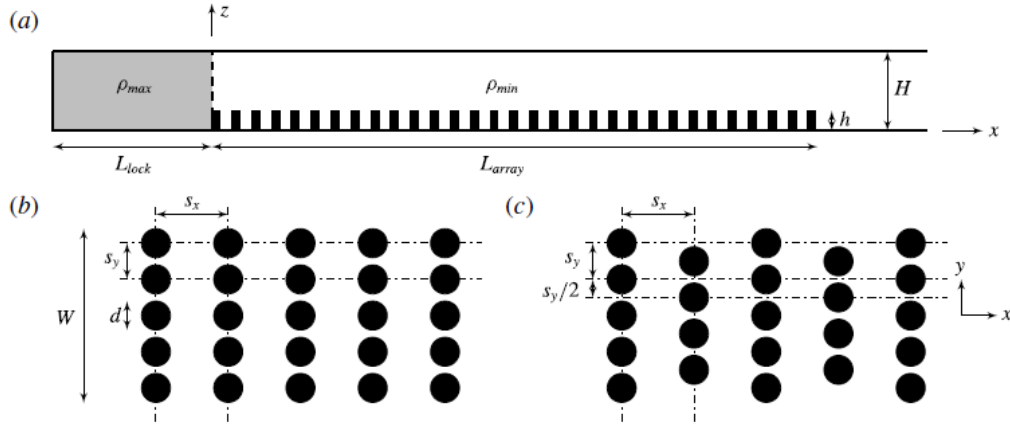


Figura 2.7: Esquema do domínio utilizado em [53]. (a) Vista principal; (b) Vista de planta; (c) Vista de planta de uma montagem secundária utilizada. Adaptada de [53].

- *Over-flow* → conjuntos de obstáculos com μ_x e μ_y elevados, uma parte do escoamento tende a desenvolver-se sobre os obstáculos (*Over-nose* [ON]), que dominará a estrutura da corrente. Este fenómeno deve-se ao arrasto excessivo nos cilindros. Neste caso, existirá convecção vertical (VC) entre o fluido denso e o fluido ambiente que se encontra na parte mais profunda, causando elevado grau de mistura. *Through-flow* ainda existirá até a um nível máximo de densidade de obstáculos, em que deixa de haver escoamento (Figura 2.8 c, d).
- *Plunging-flow* → casos com baixos μ_x e elevados μ_y . Neste caso cada linha (perpendicular à direção do escoamento) de obstáculos funciona como uma barreira ao escoamento, forçando um comportamento semelhante ao de um galgamento (Figura 2.8 e).
- *Skimming-flow* → valores elevados de μ_x e valores baixos de μ_y , representam uma disposição constituída por linhas de obstáculos paralelas entre si e em relação à direção do escoamento. A corrente de densidade, neste caso, separa-se em diferentes sub-correntes que se propagam entre as linhas de obstáculos, com pouco movimento na direção da largura (Figura 2.8 f).

Os efeitos da vegetação foram também estudados numericamente através do método LES por [5, 53].

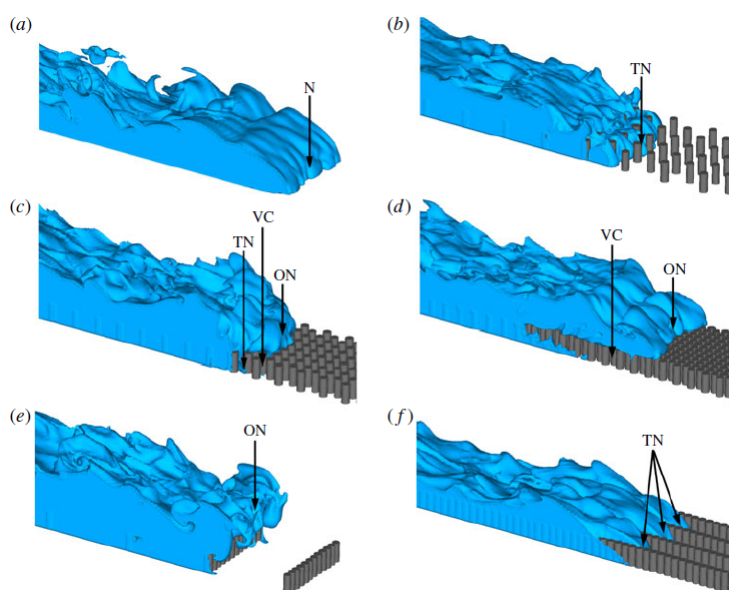


Figura 2.8: Visualização esquemática dos diferentes tipos de regimes identificados por [53]: (a) sem obstáculos; (b) *Through-flow*; (c,d) *Over-flow*. (e) *Plunging-flow*; (f) *Skimming-flow*. Retirada de [53].

2.4 Efeito do vento na propagação das correntes de densidade

Outro aspeto importante no comportamento de correntes de densidade é o vento. O efeito do vento tem sido aplicado a correntes de densidade mas também a escoamentos entre águas pouco profundas e o oceano durante períodos diurnos e noturnos por [29]. A distribuição heterogénea de temperaturas causam variação na densidade da água, produzindo um fluxo termicamente induzido à superfície (convecção natural) de zonas costeiras (zonas pouco profundas) para *offshore* (zonas profundas) durante o dia e em profundidade, na direção oposta. Durante o período noturno, em zonas pouco profundas, o fluido perde calor para o ambiente mais rapidamente, o que leva a um escoamento no sentido oposto.

Para além do método térmico para a geração de um fluxo de massa de água, existe também a ação do vento. Estudos realizados por [36] mostram que o efeito do vento é suficiente para reverter os fluxos originados termicamente, isto é, fluxos gerados por diferenças de temperatura. Estes autores mostraram também que ventos fortes têm influência na mistura vertical do escoamento. [11] discutiram a interação entre efeitos de densidade e efeitos periódicos do vento. Concluíram que, dependendo da fase relativa entre as duas forças, estas se poderão opor ou amplificar à propagação da corrente.

[12] estudou o efeito da tensão de corte periódica na superfície da água (originada pelo vento) juntamente com o efeito do aquecimento/arrefecimento das massas de água. Este efeito é normalmente estudado num domínio triangular (Figura 2.9), que permite representar de forma mais precisa os casos reais, que se verificam na transição entre zonas

pouco profundas e profundas.

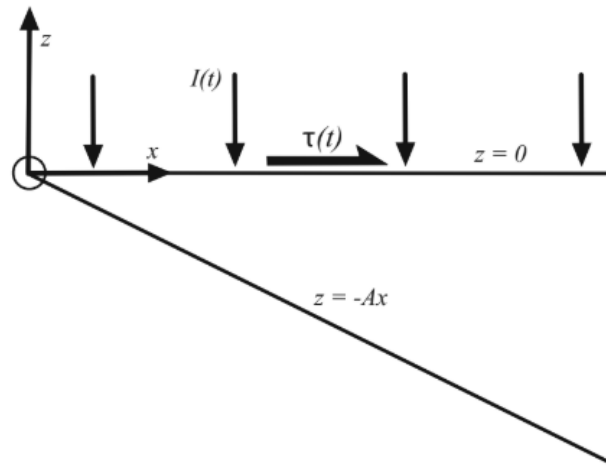


Figura 2.9: Domínio convencional utilizado para estudar o efeito da tensão de corte provocada pelo vento nas transições de lagos para oceanos. Retirada de [12].

Na Figura 2.10 apresentam-se os contornos de velocidade obtidos por [12] em simulação numérica numa posição de $z = 0$ (superfície livre), relativamente às condições impostas na Figura 2.9. Verifica-se uma imposição da força do vento relativamente ao gradiente de pressões induzido pelas diferenças de temperatura para zonas de profundidades maiores. No entanto, o seu efeito imediato está limitado às camadas adjacentes à superfície. Ao longo do tempo, este efeito propaga-se às camadas mais profundas, influenciando assim o comportamento da corrente de densidade.

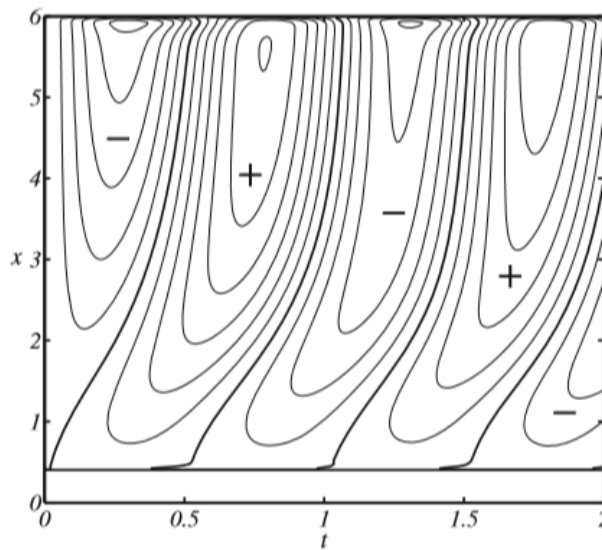


Figura 2.10: Contornos de velocidade observados em $z = 0$ (relativamente ao eixo definido na Figura 2.9). O eixo temporal representa ciclos do vento. Retirada de [12].

2.5 Interação do vento e da vegetação em correntes de densidade

No que diz respeito aos efeitos combinados da vegetação e do vento, existe um número reduzido de trabalhos desenvolvidos sobretudo no que toca a simulações numéricas. [29] utilizou um domínio semelhante ao utilizado por [12] acrescentando a vegetação fixa no fundo, representada por obstáculos verticais distribuídos uniformemente como mostra a Figura 2.11.

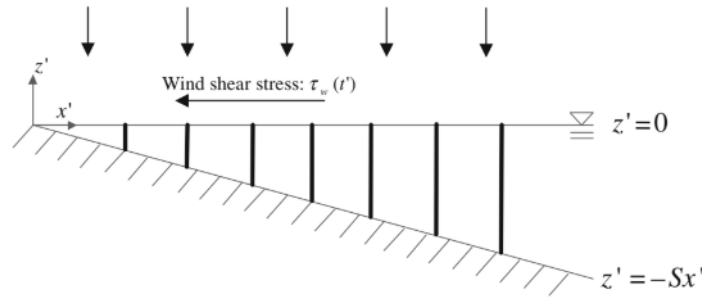


Figura 2.11: Domínio utilizado para estudos do efeito simultâneo da tensão de corte provocada pelo vento e da vegetação nas transições de lagos para oceanos. Retirada de [29].

Semelhante aos resultados apresentados em [12], [29] mostrou a influência da vegetação e do vento nos contornos de velocidade medidos à superfície (Figura 2.12). Na fase inicial, o escoamento desenvolve-se desde a costa ($x = 0$) (Figura 2.12 a). Ao incluir a vegetação (Figura 2.12 b) verifica-se uma redução no fluxo de água e uma mudança no local de ocorrência das velocidades máximas e mínimas. Com vegetação, estas velocidades ocorrem mais perto da costa. Quando se entra também em consideração com a ação do vento (Figura 2.12 c, d), os resultados são semelhantes aos obtidos por [12]. Nota-se uma imposição do gradiente de pressões de origem térmica para águas pouco profundas, sendo que para profundidades elevadas (valores elevados de x), o escoamento segue a direção do vento. No entanto, o vento tem maior influência apenas em camadas perto da superfície como foi verificado também por [12]. A presença de vegetação tem também maior impacto em zonas profundas e provoca uma redução da velocidade do escoamento.

Para estudos com vento, é comum definir-se uma tensão de corte crítica adimensional, Γ_{cri} , que representa o estado a partir do qual o vento é capaz de reverter a circulação da água à superfície. [29] definiu este parâmetro como é dito na equação 2.6,

$$\Gamma = \frac{n_v \tau_w}{\mu S Gr / \tau} \quad (2.6)$$

onde n_v é a porosidade (rácio entre o volume ocupado por água e o volume total), τ_w é a tensão de corte provocada pelo vento, μ é a viscosidade dinâmica da água, S é a inclinação do fundo, Gr é o número de Grashof e τ diz respeito ao período diário da ação do vento.

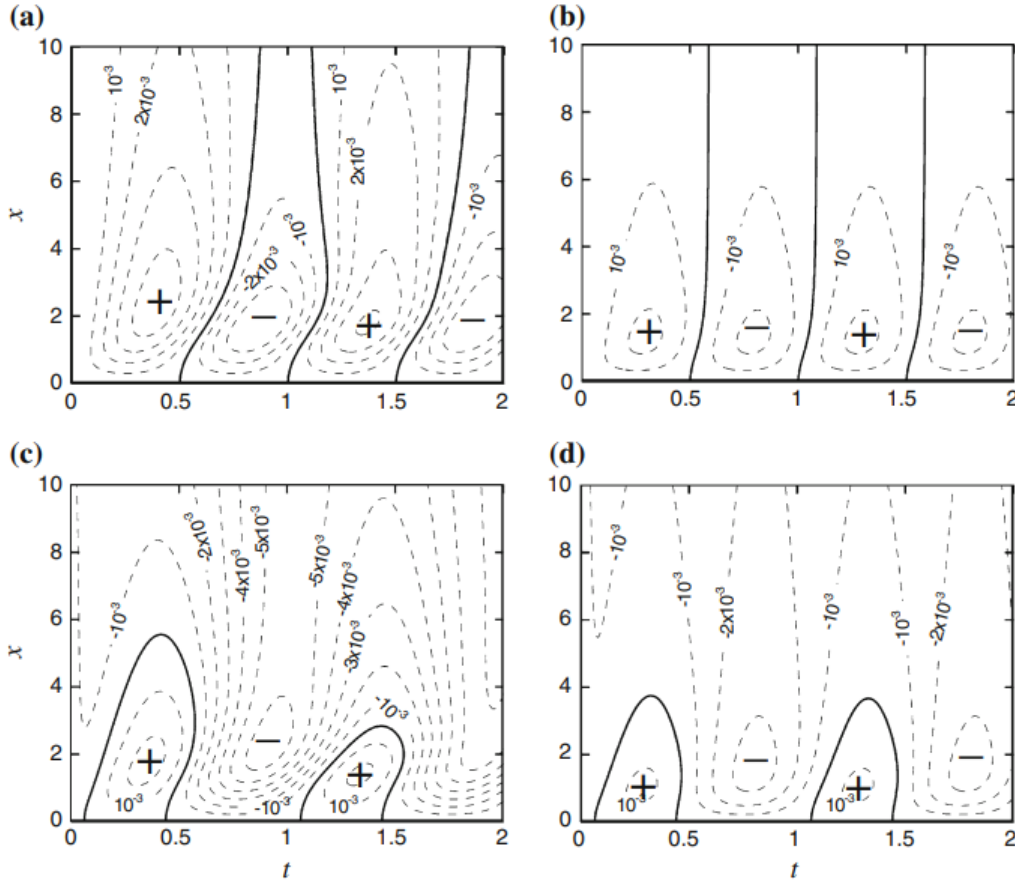


Figura 2.12: Contornos de velocidade à superfície: (a) $\phi = 0\%$, $\Gamma_{cri} = 0$; (b) $\phi = 0,22\%$, $\Gamma_{cri} = 0$; (c) $\phi = 0\%$, $\Gamma_{cri} = -0,005$; (d) $\phi = 0,22\%$, $\Gamma_{cri} = -0,005$. A linha a cheio representa velocidade 0. O sinal mais e menos representam o sentido da velocidade (para fora da costa ou em direção à costa, respetivamente). O eixo temporal representa ciclos do vento. Retirada de [29].

Este parâmetro varia com a distância à costa e tende a ter um módulo mais elevado em águas pouco profundas do que em águas profundas. Deve-se ao facto de em águas pouco profundas, existir uma maior influência das forças viscosas. Em águas com profundidades elevadas, estas forças são insignificantes, bastando um valor mais baixo de Γ_{cri} para alterar o sentido do escoamento, quando comparado com zonas pouco profundas. Ao inserir o efeito da vegetação, o valor deste parâmetro tende a ser menor e maior para zonas de profundidades baixas e elevadas, respetivamente.

[47] estudou também o efeito combinado do vento da vegetação associado ao fenómeno que realmente acontece no *Lake Argyle, Western Australia*.

Nesta revisão bibliográfica é possível constatar que são poucos os trabalhos desenvolvidos que consideram o efeito combinado dos dois elementos, sendo que alguns deles são aplicados a casos reais específicos. Nesta dissertação pretende-se preencher essa lacuna e estudar a influência do vento e vegetação na propagação e troca de massa entre a corrente de densidade e o fluido ambiente.

MODELO NUMÉRICO E CÓDIGOS DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Equações governativas

O escoamento de um fluido sem transferência de calor é descrito através das equações da conservação de massa e quantidade de movimento. Nesta secção são abordadas as equações que regem o fenómeno das correntes de densidade, como sendo um escoamento tridimensional, não estacionário, incompressível, irrotacional e estratificado.

3.1.1 Equação da continuidade

A conservação da massa é expressa através da equação da continuidade, que afirma que o fluxo líquido de massa que atravessa as fronteiras de controlo é igual à variação da massa no volume de controlo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade do fluido ambiente e u é a componente da velocidade na direção i . Para escoamento incompressível a equação fica reduzida a

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

3.1.2 Equação de balanço de quantidade movimento

O escoamento é controlado pela segunda lei de Newton, que relaciona a força exercida num elemento de fluido com a sua massa e aceleração. Para um fluido Newtoniano e escoamento incompressível sem trocas de calor, a equação do balanço de quantidade de

movimento é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - S_{M_i} \quad (3.3)$$

onde S_{M_i} é a força de campo exercida no fluido na direção i . Este termo apenas será diferente de zero quando $i=3$, no caso da direção vertical, representando a ação da gravidade reduzida.

Em escoamentos de correntes de densidade e escoamentos estratificados existe a influência da diferença entre as densidades dos fluidos. No entanto esta pode ser negligenciada nos termos da aceleração e nos termos viscosos das equações de Navier-Stokes. Esta simplificação é conhecida como a aproximação de Boussinesq e apenas aparecerá expressa quando relacionada com a aceleração da gravidade (presente no termo S_{M_i}) sob a forma de gravidade reduzida (Equação 2.2).

3.1.3 Equação de transporte de massa volúmica

Em escoamentos não estratificados, a massa volúmica é constante não intervindo nos termos derivativos da equação do balanço de quantidade de movimento. Tratando-se o caso em questão de um escoamento estratificado, o campo de densidades evolui no tempo e no espaço. Assim é necessário considerar esta evolução. Apresenta-se na equação 3.4 uma versão mais abrangente da equação 3.1 que já inclui o termo da difusividade molecular e o termo fonte.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = \kappa \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_j \partial x_j} + S \quad (3.4)$$

onde κ é o coeficiente da difusividade molecular e S é o termo fonte.

3.2 Modelo de turbulência

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações intensas de velocidade, pressão, massa volúmica e outras quantidades. Estas flutuações contribuem de forma significativa na mistura e no transporte da quantidade de movimento e massa na maioria dos escoamentos e, por isso, têm uma influência determinante nas distribuições destas propriedades no campo de escoamento.

A complexidade dos escoamentos turbulentos não permite uma abordagem estritamente analítica do problema. Neste contexto, foram desenvolvidos diversos métodos numéricos para resolver as equações da conservação de massa e do balanço de quantidade movimento. O método mais preciso de simular escoamentos turbulentos é a *Direct Numerical Simulation* (DNS). Este método resolve as equações de Navier-Stokes de forma direta sem necessidade de recorrer a modelos de turbulência, usando uma discretização espacial muito refinada. Neste método, todas as escalas do escoamento são resolvidas. Portanto, o DNS requer um elevado esforço computacional e, portanto, a sua reduzida aplicabilidade

(apenas para escoamentos com números de Reynolds pequenos ou envolvendo geometrias simples).

Para escoamentos com caráter estacionário, é normalmente usado o método *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS). A principal premissa é resolver as equações de Navier-Stokes utilizando as médias de Reynolds e recorre-se a modelos de turbulência para modelar os efeitos da turbulência do escoamento. Devido a sua reduzida exigência computacional, esta abordagem é bastante utilizada na prática atual da engenharia. No entanto, nos casos em que os efeitos transitórios têm importância, este método por vezes falha em prever as características do escoamento.

Uma abordagem alternativa ao DNS e RANS, usada neste dissertação, é o *Large Eddy Simulation* (LES) proposto por *Smagorinsky* [44]. Este método resolve as grandes escalas do escoamento diretamente como o DNS e modela as pequenas escalas (SGS - *Sub-grid scale*). Esta abordagem permite o LES ser mais preciso que o RANS e ter menos custo computacional que o DNS. Adicionalmente, verifica-se que as SGS têm maior isotropismo e homogeneidade, tornando-se a modelação das pequenas escalas mais precisa, comparando com uma modelação de todas as escalas utilizada na abordagem RANS. Assim, o LES considera-se ser a abordagem mais eficiente para as simulações de escoamentos turbulentos com caráter transitório [51]. Uma comparação entre os três métodos é feita na Figura 3.1. Confirma-se claramente que o RANS apenas resolve o comportamento médio de todo o escoamento.

No LES, as equações de Navier-Stokes são resolvidas diretamente para as grandes escalas do movimento e as pequenas escalas são modeladas mediante a aplicação de um filtro às equações instantâneas de conservação. Este filtro, ao qual se dá o nome de filtragem implícita, permite formular as equações que regem o escoamento. Assim, a qualidade dos resultados LES dependem da dimensão do filtro utilizada. A filtragem de uma função é definida como a convolução da função com um núcleo que corta os valores fora da largura de filtragem. No filtro utilizado, designado de *Box filter*, Δ e $G(x)$ representam a largura e o núcleo de filtragem no espaço físico, respetivamente. H representa uma função de degrau que vale 0 para valores de argumento negativos e 1 quando o argumento é positivo. O núcleo de filtragem em espaço físico é dado sob a forma de

$$G(x) = \frac{1}{\Delta} H\left(\frac{1}{2}\Delta - |x|\right) \quad (3.5)$$

As equações da conservação de massa e do balanço de quantidade de movimento filtradas para um fluido newtoniano e incompressível tomam as seguintes formas, respetivamente

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - g_i \frac{\bar{\rho}}{\rho_0} \delta_{i3} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.7)$$

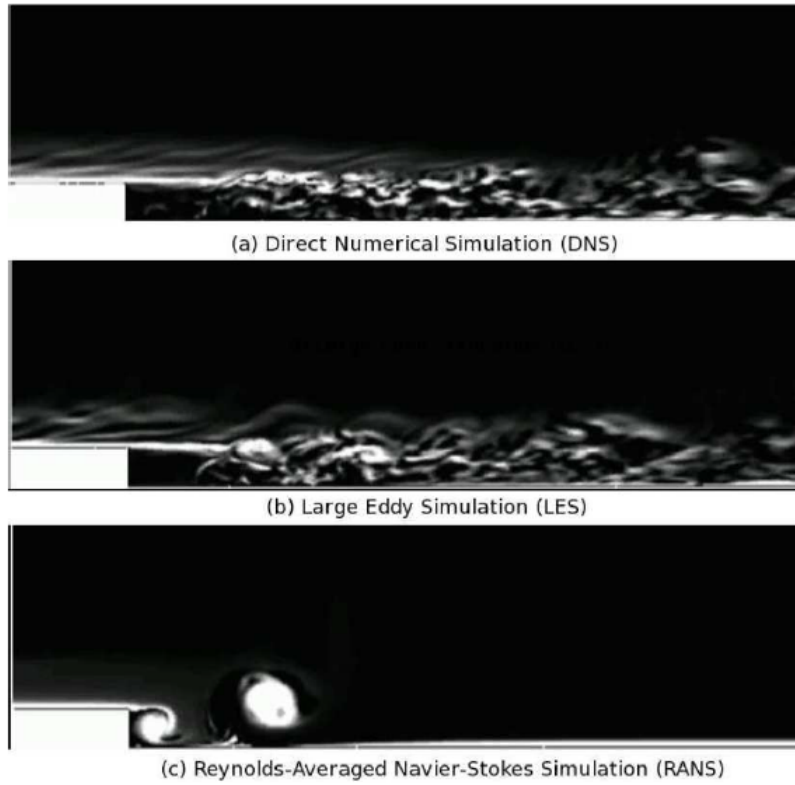


Figura 3.1: Escoamento sobre um degrau direcionado segundo o escoamento obtido por: (a) DNS; (b) LES; (c) RANS. Retirada de [52].

As variáveis da forma $\overline{\phi}$, sendo ϕ uma variável qualquer, representam variáveis filtradas. A tensão da SGS é definida da seguinte forma

$$\tau_{ij} = (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}) \quad (3.8)$$

e a equação de transporte de densidade filtrada é

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_j}}{\partial x_j} = \kappa \frac{\partial^2 \overline{\rho}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial X_j}{\partial x_j} \quad (3.9)$$

$$X_j = \overline{\rho u_j} - \overline{\rho} \overline{u_j} \quad (3.10)$$

onde ρ_o é densidade de referência; $\overline{u_i}$ é velocidade filtrada; \overline{p} é pressão filtrada; ν é viscosidade cinemática; X_j é fluxo de massa volúmica; τ_{ij} é o tensor das tensões das pequenas escalas que representa o efeito do escoamento ao nível das pequenas escalas. δ_{ij} é o Delta de Kronecker e é igual à unidade quando $i = j$.

A precisão do modelo LES depende fortemente da sua capacidade de modelar as pequenas escalas (SGS). Nesta dissertação será usado um modelo proposto por Smagorinsky em 1963, que usa uma viscosidade turbulenta linear, ν_t , para modelar SGS dada da seguinte forma:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \overline{S_{ij}} \quad (3.11)$$

A viscosidade turbulenta é definida:

$$\nu_t = (C_S \Delta)^2 |\bar{S}| = (C_S \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3.12)$$

onde Δ é definido como sendo a dimensão da malha, \bar{S} é a taxa de deformação e C_S é a constante de Smagorinsky que tem valores entre 0,1 e 0,2. Nesta dissertação foi usado o valor de 0,158 [14]. Esta viscosidade, que é modelada pelo modelo de Smagorinsky, tem limitações visto depender da malha utilizada, não permitindo a simulação do espectro invertido.

3.3 Solver

O *solver* utilizado para a realização das simulações foi o *interMixingFoam*, capaz de resolver as equações de continuidade para três fluidos incompressíveis, dois dos quais miscíveis, utilizando o método VOF para capturar a superfície livre. No entanto, o OpenFOAM não disponibiliza o código necessário para utilizar este *solver* juntamente com o modelo de turbulência LES. Assim, fez-se uma adaptação do código com o propósito especial de ser utilizado nas simulações nesta dissertação, o qual se encontra no apêndice D.

3.4 Técnica VOF (*Volume-of-Fluid*)

A modelação da superfície livre pode ser feita por várias técnicas como o *Lagrangian grid method*, *surface height method*, *marker-and-cell (MAC) method* e VOF. A técnica VOF permite obter uma boa funcionalidade de localização de superfície livre a partir de uma utilização de memória e CPU não excessivas. O OpenFOAM utiliza uma técnica VOF dotada dos seguintes recursos:

- Uma rotina para descrever e localizar a posição da superfície livre. Esta rotina opera através de uma função F que representa a fração volúmica de fluido em cada elemento da malha. Se $F=1$ então está-se na presença de um elemento preenchido totalmente por líquido. Se $F=0$, está-se na presença de um elemento preenchido por gás. Um elemento com um F entre 0 e 1 contém a interface entre líquido e gás (em caso específico a superfície livre). Esta localização será tanto mais precisa quanto mais refinada for a malha. Um exemplo bastante simples da utilização desta técnica a uma dimensão e a duas dimensões é dado pela Figura 3.2.
- A dependência temporal da função F é regida pela seguinte equação de transporte:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (F u_j) = 0 \quad (3.13)$$

No caso de uma abordagem Euleriana, a Equação 3.13 diz que F se move com o fluido.

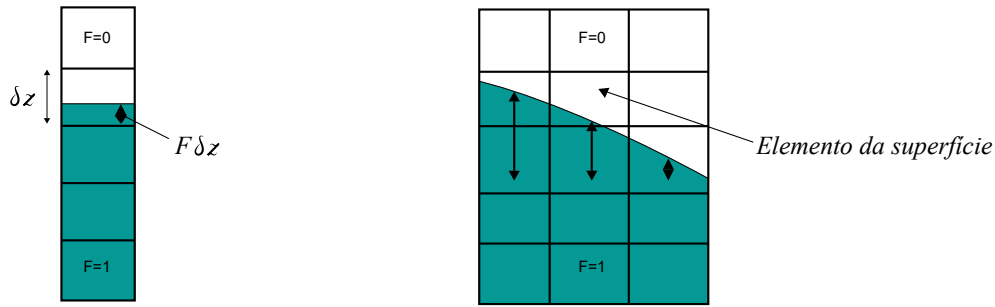
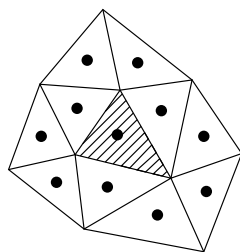


Figura 3.2: Exemplo simplificado da utilização da técnica VOF. Adaptada de [52].

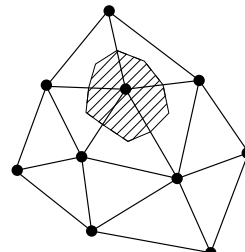
3.5 Método dos volumes finitos

O método dos volumes finitos (FVM - *Finite volume method*) é um método de discretização utilizado em simulações numéricas baseadas em leis de conservação de propriedades. Das suas principais características, destacam-se a possibilidade de ser aplicado tanto a malhas estruturadas como a malhas não estruturadas e a sua capacidade de conservação local do fluxo numérico, ou seja, o fluxo numérico é conservado desde uma célula até às células vizinhas. Esta última propriedade permite ao método FVM ser bastante útil em áreas como mecânica dos fluidos. Segundo este método, os cálculos e as equações são resolvidas para o centro de cada célula/volume de controlo e, através do teorema da divergência, é feita uma formulação integral dos fluxos das propriedades nas fronteiras do volume.

Este método pode ser distinguido entre *cell-centered* e *vertex-centered* como se observa na Figura 3.3, sendo que o utilizado é o método *cell-centered*, em que os valores das variáveis estão associados ao centro da célula. No caso *vertex-centered* as variáveis são associadas aos nós da malha.



(a) Volume de controlo do método FVM *cell-centered*



(b) Volume de controlo do método FVM *vertex-centered*

Figura 3.3: Volumes de controlo associados ao método FVM *cell-centered* e *vertex-centered*. Adaptado de [13].

3.6 Esquemas de resolução numérica

Os termos das equações de Navier-Stokes são resolvidos usando diferentes esquemas numéricos, quer para resolver derivadas temporais, gradientes, divergentes e interpolações.

3.6.1 Esquemas temporais

Para resolver as derivadas temporais de primeira ordem foi utilizado o método de Euler implícito de primeira ordem para escoamentos transitórios, que se traduz sob a forma da equação

$$y_{m+1} = y_m + f(t_{m+1}, y_{m+1})h \quad (3.14)$$

sendo f uma qualquer função integrável e h o passo de tempo.

3.6.2 Esquemas de resolução de gradientes

Para o cálculo de todos os gradientes, foi utilizado o esquema de Gauss linear, implicando assim a integração de Gauss dos volumes finitos da malha. Este procedimento requer uma interpolação dos valores desde o centro de cada célula até às suas faces. O termo linear apenas significa que esta interpolação é feita de forma linear.

O termo gradiente é obtido através do integral sobre a face da seguinte forma:

$$\int_{V_p} \nabla \phi dV = \oint_{\partial V_p} ds \phi = \sum_f s_f \phi_f \quad (3.15)$$

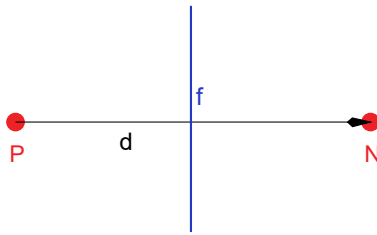


Figura 3.4: Disposição dos elementos e variáveis utilizadas na descrição do esquema de resolução de gradientes.

A avaliação do valor de qualquer variável ϕ na face do volume de controlo a partir do centro da célula é feita através de

$$\phi_f = f_x \phi_P + (1 - f_x) \phi_N \quad (3.16)$$

com

$$f_x = \frac{\overline{fN}}{\overline{PN}} \quad (3.17)$$

onde ϕ_f é o valor de ϕ na face do volume, ϕ_P e ϕ_N são os valores da variável no centro do elemento P e N separados por uma distância d , f representa a face do elemento, como indicado na Figura 3.4.

3.6.3 Esquemas de resolução de divergentes

Contrariamente aos esquemas numéricos apresentados anteriormente, o cálculo de divergentes foram feitos utilizando esquemas diferentes para termos diferentes das equações da forma $\nabla \cdot \dots$. Por constituírem dos maiores desafios de resolução numérica, as opções oferecidas pelo OpenFOAM são bastante diferenciadas. No entanto, todos os esquemas escolhidos são baseados na integração de Gauss. Os esquemas utilizados foram: *Gauss linear*, um esquema de segunda ordem para termos da forma $\nabla \cdot (U_{rb}\alpha_1)$; *limitedLinearV*, que é um esquema limitado na direção *upwind* em regiões cujo gradiente varia rapidamente adaptado a grandezas vetoriais (vetor velocidade) para termos da forma $\nabla \cdot (U\alpha_1)$. Foi também utilizada a variação *vanLeer*, semelhante ao *limitedLinear*, mas com uma limitação menos rígida, para termos da forma $\nabla \cdot (\rho UU)$.

3.6.4 Esquemas Laplacianos

Para resolver termos da forma ∇^2 utilizou-se a única opção disponibilizada no OpenFOAM, o esquema de Gauss linear corrigido. Este esquema requer um esquema de interpolação para o coeficiente de difusão e um esquema para gradientes normais às superfícies.

Em relação ao esquema de interpolação, esta é feita de forma linear (entre o centro de cada célula e as suas faces.) Este esquema é o mais utilizado na maior parte dos casos relevantes nesta dissertação. As únicas exceções acontecem quando se faz uso do método DNS, onde a interpolação cúbica é mais utilizada.

3.7 Controlo de solução e algoritmos

Nesta secção serão apresentados os algoritmos de resolução das equações utilizados para resolver as diferentes variáveis. Para resolver a pressão utilizou-se o *solver* GAMG, caracterizado por ser um *solver* geométrico/algébrico generalizado multi-malha (*geometric-algebraic multi-grid*). Das suas propriedades destaca-se a aplicabilidade tanto em matrizes simétricas como assimétricas e o eficiente transporte de informação ao longo do domínio da solução. O uso deste *solver* implica a especificação de um suavizador e de uma tolerância mínima. O seu modo de funcionamento passa por obter uma primeira solução considerando apenas uma malha com poucos elementos e utilizando esta solução como valor inicial para obter uma solução final mais precisa em todos os elementos da malha. Este método é mais rápido que os restantes métodos disponíveis no OpenFOAM e, na prática, este método começa por utilizar a malha inserida pelo utilizador como malha mais grosseira, sendo que esta vai sendo refinada por estágios. O suavizador utilizado é

o DIC para o cálculo da pressão que remete para *diagonal incomplete-Cholesky*, adequado para a resolução de matrizes simétricas.

Para a velocidade e para o cálculo do parâmetro F do método VOF, o *solver* utilizado foi o smoothSolver. O suavizador utilizado é o symGaussSeidel, destinado a matrizes simétricas.

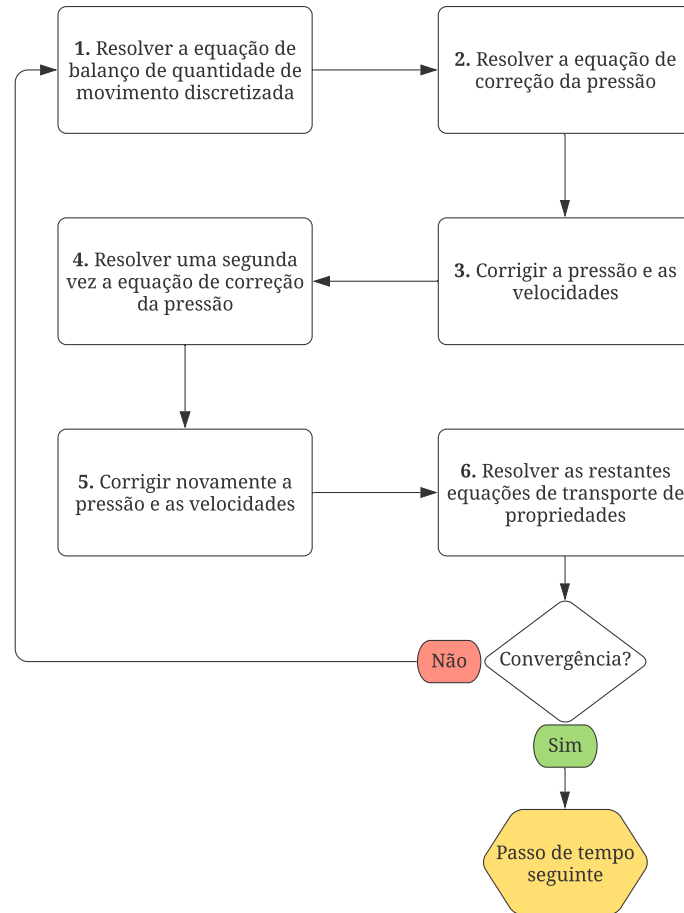


Figura 3.5: Fluxograma descritivo do algoritmo PIMPLE

A resolução das equações passa por um processo iterativo e, como tal, baseia-se na redução dos valores residuais em iterações consecutivas. Resíduo é uma medida do erro da solução que quanto menor for o seu valor, mais precisa é a solução. É avaliado como sendo a diferença entre os dois lados da equação, quando se faz a substituição pela solução obtida nessa mesma iteração. No código utilizado é definida uma tolerância absoluta de 1×10^{-7} , 1×10^{-6} e 1×10^{-6} para a pressão, velocidade e α 's, respetivamente e a tolerância relativa de 0,1 para todas as variáveis. A tolerância relativa refere-se à comparação com os valores residuais iniciais. O *solver* passa ao passo de tempo seguinte quando alguma destas condições for atingida.

Para controlar o procedimento de acoplamento das equações de momento e conservação de massa, são utilizadas rotinas iterativas designadas de algoritmos. Os dois algoritmos mais utilizados em CFD são o PISO (*pressure-implicit split-operator*) ou o SIMPLE (*semi-implicit pressure-linked equations*). O algoritmo utilizado nesta dissertação é o algoritmo PIMPLE, que é uma combinação destes, do PISO e do SIMPLE, e é apropriado para regimes transitórios. O algoritmo PIMPLE funciona essencialmente como o método SIMPLE, sendo que, para cada passo de tempo, são feitas iterações com base em corretores (num ciclo exterior) até ser atingida uma convergência. Uma vez atingida a convergência, o PIMPLE prossegue para o novo passo de tempo. Este algoritmo permite uma maior estabilidade quando comparado com o PISO.

O modo de funcionamento de todos os algoritmos passa por resolver a cada passo de tempo a equação em ordem à pressão, impondo a conservação de massa, com uma correção explícita da velocidade para satisfazer as equações do balanço da quantidade de movimento. É possível também definir alguns parâmetros que definem o número de ciclos que o algoritmo deve resolver. O algoritmo utilizado resolve a equação em ordem à pressão duas vezes e repete o processo uma única vez em cada passo de tempo. Para uma compreensão mais clara deste algoritmo, apresenta-se na Figura 3.5 um fluxograma que descreve todo o processo. O processo pode ser repetido o número de vezes que se pretenda, sendo que é apresentado o caso em que apenas é feita uma repetição.

VERIFICAÇÃO E TESTES DO MODELO NUMÉRICO

4.1 Análise de sensibilidade da malha

A análise de sensibilidade da malha é feita em 2D nas condições experimentais da experiência 2 apresentadas por [17].

O domínio utilizado é um canal retangular com 3,48 metros de comprimento e 0,5 metros de profundidade, com condição de não escorregamento nas superfícies laterais, superior e inferior. Foi também considerada a presença de superfície livre. Na experiência 2, foi utilizado o rácio $R = H/x_0 = 1$, com $x_0 = 400$ mm e $H = 400$ mm. A diferença de densidades usada foi calculada com base na gravidade reduzida $g' = g\Delta\rho/\rho_0 = 120$ mm/s⁻².

Foram testadas quatro malhas com diferentes refinamentos, designadas como malha A, B, C e D. As dimensões e o número de elementos utilizados estão dispostos na Tabela 4.1. Em relação à dimensão vertical, nas malhas foram utilizados elementos com dimensão progressivamente maior conforme estes se afastavam das paredes. Para a comparação com

Tabela 4.1: Malhas utilizadas no estudo de dependência da malha.

	Número de elementos	Dimensão dos elementos
A	430x63	0,02H
B	870x125	0,01H
C	1392x200	0,00625H
D	1740x250	0,005H

os resultados experimentais de [17], analisaram-se as velocidades de frente da corrente e o desenvolvimento da estrutura ao longo do tempo para as diferentes discretizações.

A análise da estrutura da corrente de densidade foi feita comparando imagens retiradas à mesma distância adimensional para cada malha. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e

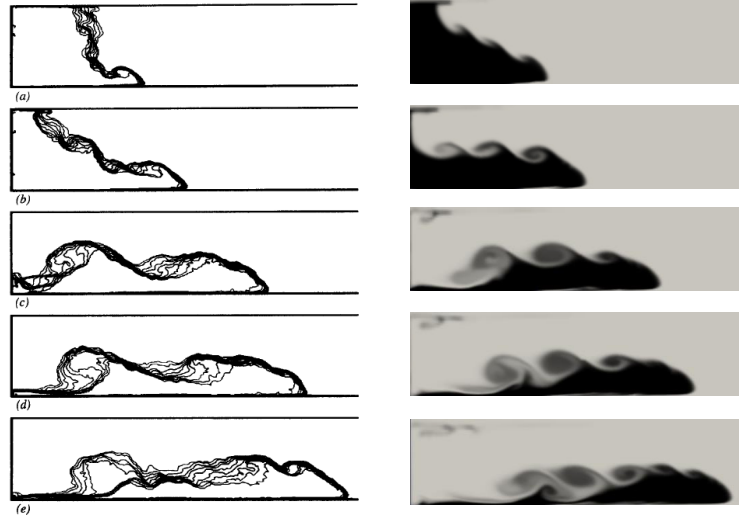


Figura 4.1: Evolução da corrente de densidade: comparação da experiência 2 de [17] (esquerda) e da simulação 2D LES para a malha B. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$.

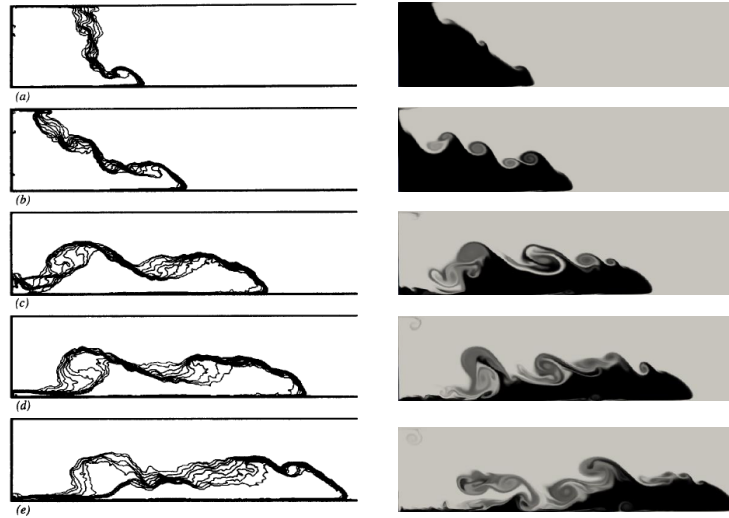


Figura 4.2: Evolução da corrente de densidade: comparação da experiência 2 de [17] (esquerda) e da simulação 2D LES para a malha C. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$.

4.4 permitem evidenciar a pequena diferença entre os resultados experimentais e os resultados simulados utilizando as várias discretizações de malha. Optou-se por mostrar também os resultados relativos à posição da frente de onda obtidos com uma malha A (bastante mais grosseira), demonstrando claramente que a malha tem influência significativa nos resultados, quando esta é constituída por poucos elementos. No que diz respeito

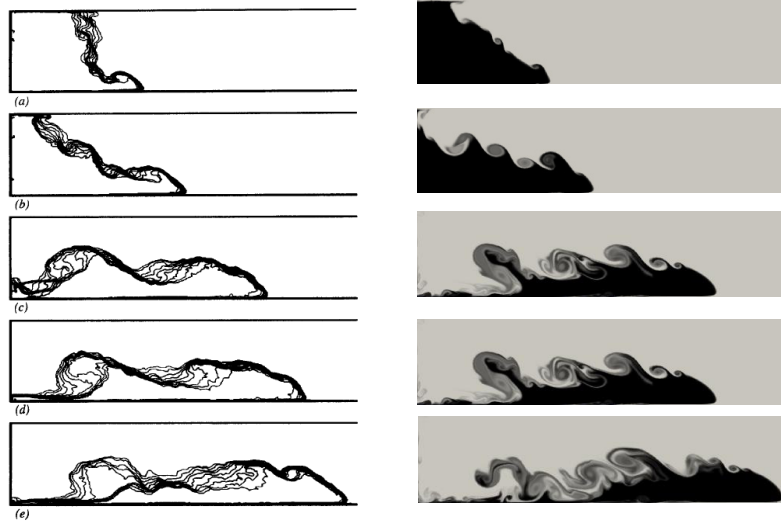


Figura 4.3: Evolução da corrente de densidade: comparação da experiência 2 de [17] (esquerda) e da simulação 2D LES para a malha D. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$.

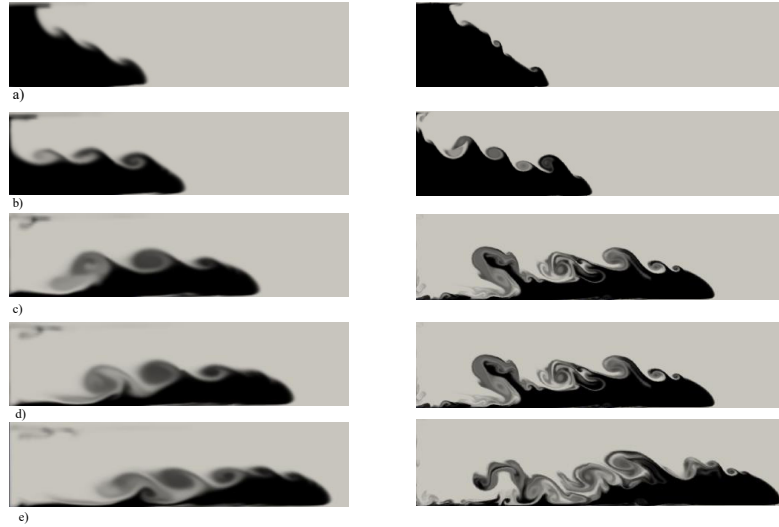


Figura 4.4: Evolução da corrente de densidade: comparação da simulação 2D LES malha A e da simulação 2D LES para a malha D. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,60$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,10$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$.

à malha C e D, a diferença é praticamente negligenciável (Figura 4.2 e 4.3). Esta constatação mostra que os resultados já não dependem da discretização da malha. À medida que se aumentou o número de elementos da malha, notou-se o aparecimento de maior número de vórtices (*Kelvin-Helmholtz*) de pequena dimensão na interface da corrente de densidade como mostra a Figura 4.4.

A confirmação desta independência faz-se através da análise da velocidade de frente

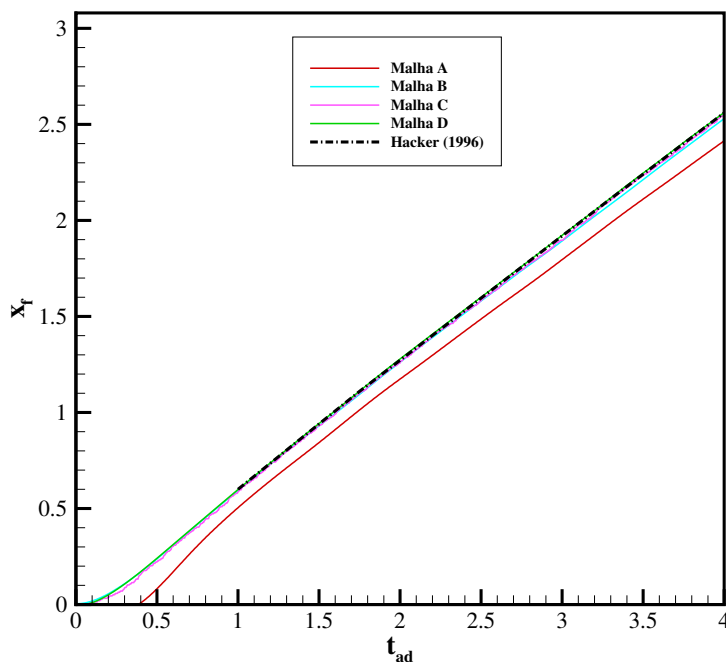


Figura 4.5: Evolução da posição da frente da corrente para a malha A (435x63), malha B (870x125), malha C (1392x200) e malha D (1740x250) e resultados experimentais obtidos por [17] para a experiência 2.

da corrente na Figura 4.5 para as quatro malhas consideradas. Verifica-se que a malha D é a que permite obter resultados que se aproximam mais dos dados experimentais de Hacker (1996). Trata-se de uma malha estruturada em todo o domínio com dimensão máxima de elemento de 2 milímetros, sendo constituída por 435000 elementos. À medida que a malha se torna mais grosseira, os pontos afastam-se cada vez mais da linha experimental, evidenciando-se esse aspeto através da malha A, que já fornece resultados muito diferentes dos experimentais de [17].

4.2 Verificação do modelo numérico

Utilizando a malha D que já possui refinação suficiente, executaram-se simulações nas condições das três experiências realizadas em [17], permitindo verificar se o modelo numérico é robusto o suficiente para simular correntes com diferentes velocidades. Na Tabela 4.2 apresentam-se os dados relativos às três experiências (1, 2 e 3). Semelhante ao teste de sensibilidade da malha, serão comparadas as estruturas da corrente com os dados experimentais de [17] bem como a evolução da posição da frente da corrente com o tempo para as experiências 1, 2 e 3.

Os momentos iniciais do escoamento são semelhantes nos três casos como se verifica nas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8. Observa-se uma corrente de fluido denso a escoar por baixo

Tabela 4.2: Experiências realizadas por Hacker (1996)

Experiência	R	x_0	H	Re_H
1	0,67	0,3	0,2	14 000
2	1	0,4	0,4	39 400
3	1,78	0,15	0,267	22 000

do fluido ambiente, criando zonas de turbulência na interface dos dois fluidos. Em todos os casos, nota-se que o fluido ambiente atinge a parede quando a corrente atinge duas distâncias (adimensionadas com x_0). Após atingir a parede, este fluxo de fluido ambiente reflete e afeta o desenvolvimento de toda a corrente, sob a forma de um escoamento de água menos densa na parte traseira da corrente de densidade. As consequências desta reflexão diferem bastante nas três experiências [17].

Para a experiência 1, dá-se a formação de uma estrutura clássica de uma corrente de densidade. Na interface formam-se vórtices de *Kelvin-helmholtz*, causando elevados graus de mistura entre o fluido ambiente e a corrente, resultando numa zona de escoamento com pouco momento linear que acaba por se separar da cabeça da corrente (Figura 4.6 c). Com o passar do tempo, a zona da frente da corrente vai sendo como que "erodida", i.e. cada vez menos homogênea como se observa também na Figura 4.6 d.

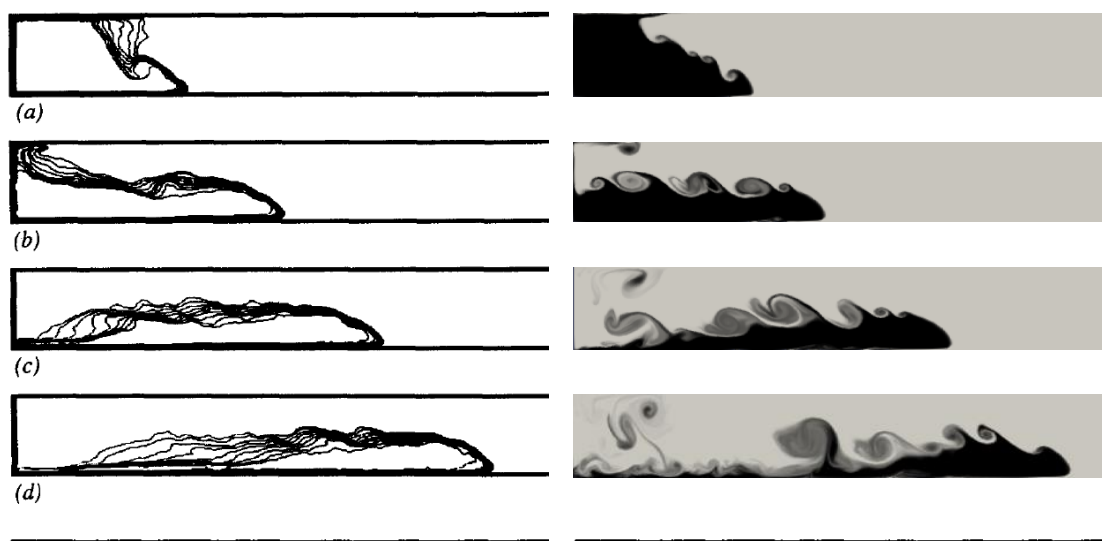


Figura 4.6: Evolução da corrente de densidade. Experiência 1 de [17]. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,47$; (b) $l = 1,33$; (c) $l = 2,20$; (d) $l = 3,1$. A escala representa distâncias adimensionais com x_0 .

Na experiência 2 (Figura 4.7) o código numérico foi capaz de simular a corrente de densidade na sua fase de queda, sendo possível identificar diferenças que advêm do movimento de abertura de comporta que introduz deslocamentos secundários do fluido no caso experimental. A vantagem das condições de fronteira e condições iniciais "ideais" usadas nas simulações poderão também constituir fonte de diferenças entre os resultados.

Nas imagens referentes a este caso é possível notar a formação de um número elevado de vorticidades quando comparado com os dados empíricos, o que será certamente influenciado pelo facto de a simulação ter sido realizada em 2D. O efeito 3D que será adicionado na parte final da dissertação permite dissipar grande parte da turbulência e permite que a estrutura se assemelhe com maior grau aos resultados experimentais.

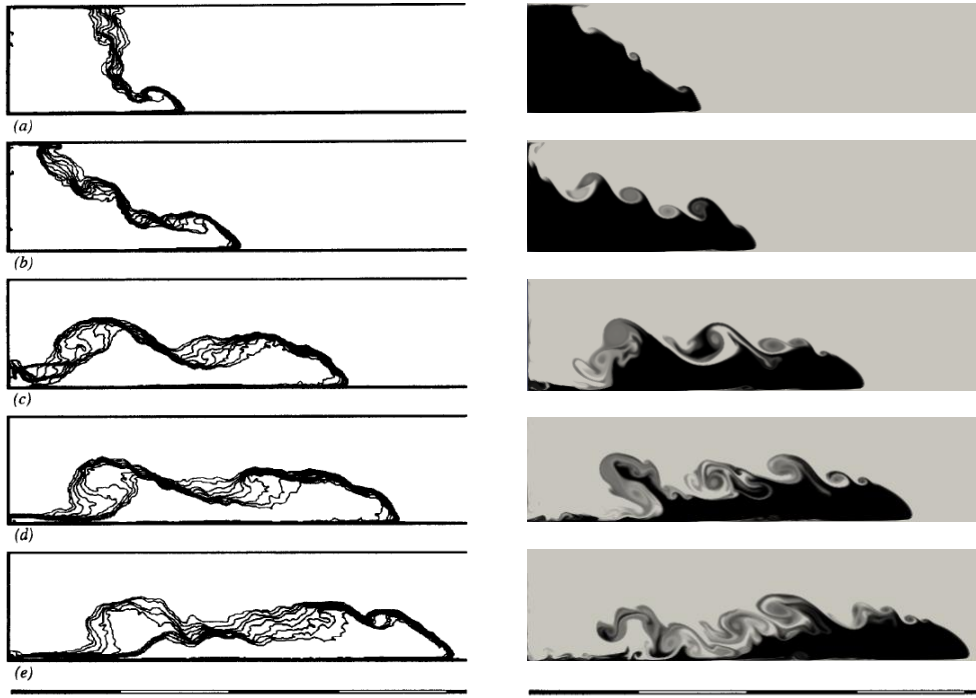


Figura 4.7: Evolução da corrente de densidade. Experiência 2 de [17]. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 0,6$; (b) $l = 1,11$; (c) $l = 2,1$; (d) $l = 2,56$; (e) $l = 3,08$. A escala representa distâncias adimensionais com x_0 .

Na experiência 3 observa-se grande semelhança nos momentos iniciais da fase de queda. Nas simulações 2D existe a formação de vórtices não só na interface entre o fluido denso e o fluido ambiente mas também na zona da cauda. O efeito de estratificação do escoamento observado na experiência de [17] deve-se à terceira dimensão da turbulência (porque a turbulência será sempre 3D para o caso em estudo), que é impossível de verificar nas simulações em 2D. Nas fases mais avançadas da fase de queda observadas na Figura 4.8 e, f, g, h, nota-se uma redução da velocidade da frente da corrente face aos resultados experimentais, pelo que o declive médio da regressão linear usada para calcular a velocidade está presente na Tabela 4.3.

Existem também diferenças entre as simulações LES e os resultados empíricos associados à simetria do escoamento, onde se verifica uma assimetria da corrente nos resultados empíricos, causada por uma maior velocidade das camadas inferiores da corrente. [37] atribui esta assimetria à abertura física da comporta, que, ao acontecer, permite que as camadas inferiores se comecem a deslocar antes das camadas superiores.

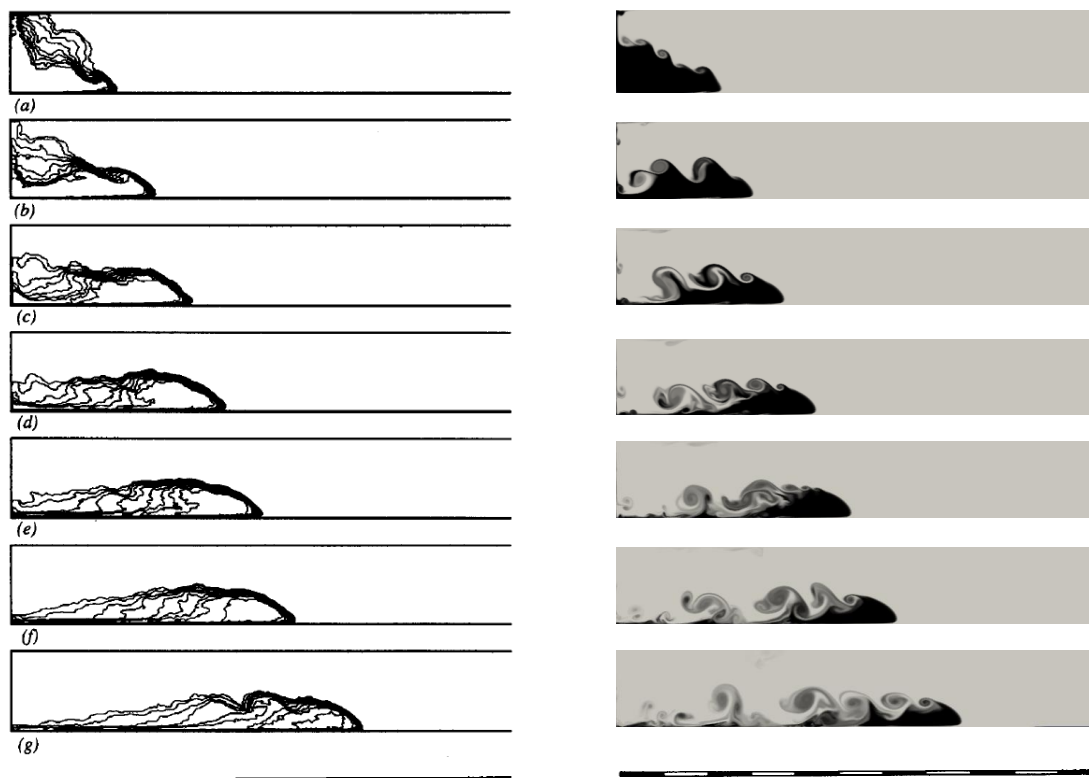


Figura 4.8: Evolução da corrente de densidade. Experiência 3 de [17]. Contornos de densidade em posições adimensionais subsequentes, $l = (x_f - x_0)/x_0$: (a) $l = 1,33$; (b) $l = 2,17$; (c) $l = 3,00$; (d) $l = 3,73$; (e) $l = 4,53$; (f) $l = 5,27$; (g) $l = 6,8$; (h) $l = 8,13$. A escala representa distâncias adimensionais com x_0 .

O número de Froude $Fr = U_f/\sqrt{g' \cdot H}$ da corrente de densidade obtido para as três simulações feitas encontra-se na Tabela 4.3. Comparam-se também os valores obtidos numericamente com os valores obtidos experimentalmente. Os valores numéricos foram obtidos através de uma regressão linear feita com base nos resultados (ignorando a fase de aceleração da corrente), pelo que se apresentam nas Figuras 4.5 (malha D), 4.9 e 4.10 a comparação dos pontos obtidos numericamente com os pontos retirados de [17] para a experiência 2, 1 e 3, respetivamente. As unidades do gráfico são adimensionais tal como indicadas na Tabela 4.4.

Nota-se suficiente semelhança entre os resultados, com um erro relativo inferior a 5%, pelo que se conclui que o modelo numérico utilizado permite simular o fenómeno da formação de correntes de densidade com o rigor suficiente e necessário. Metodologia de validações similares foram também realizadas em [37] e em [30].

Tabela 4.3: Números de Froude e comparação com resultados de Hacker (1996)

Experiência	Froude numérico	Froude experimental	Erro relativo (%)
1	0,4607	0,45	2,4
2	0,4623	0,45	2,7
3	0,438	0,46	4,8

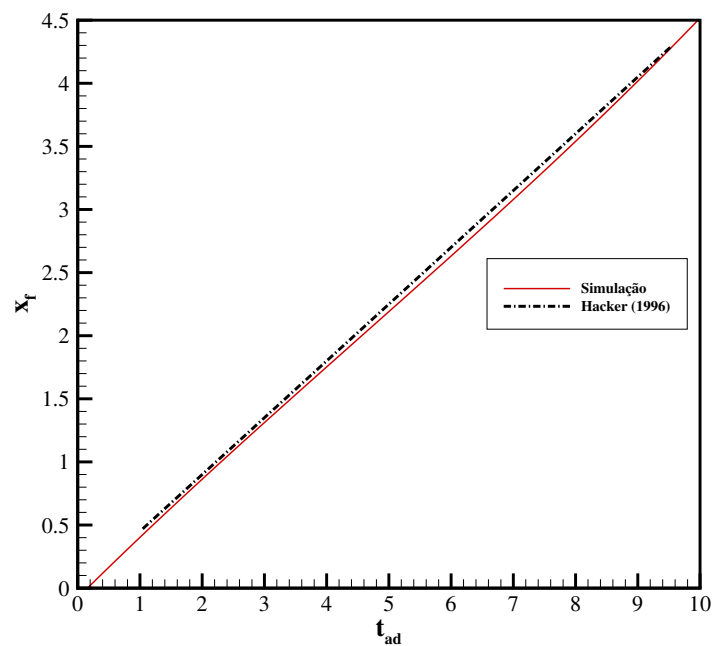


Figura 4.9: Evolução temporal da posição da frente da corrente obtida numericamente da experiência 1 e comparação com resultados experimentais de [17].

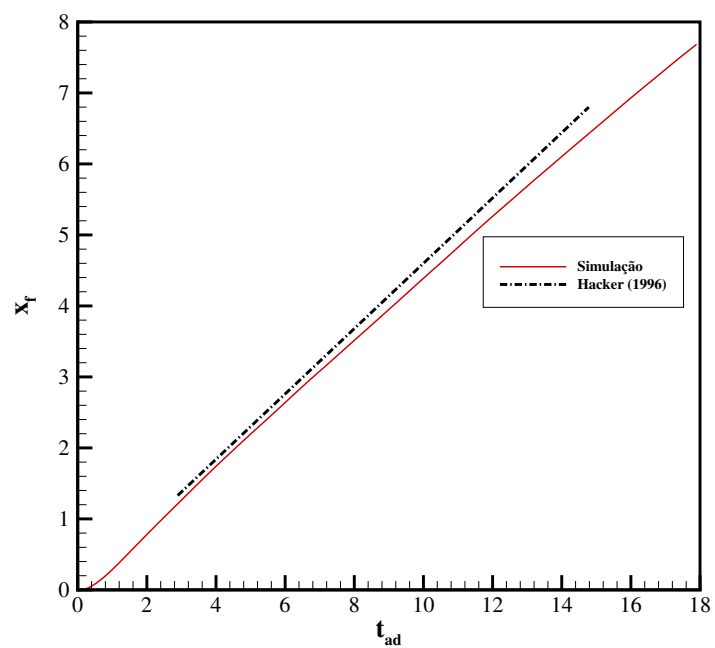


Figura 4.10: Evolução temporal da posição da frente da corrente obtida numericamente para a experiência 3 e comparação com resultados experimentais de [17].

É possível notar alguma massa de fluido denso a ficar retida perto da parede esquerda e da superfície livre nas simulações, o que difere dos resultados experimentais em todos os casos já apresentados. Este efeito é causado pelo arrasto provocado pela camada de ar nas simulações, onde também existe grandes gradientes de velocidade. Foram realizadas simulações onde não se considerou superfície livre, sendo esta substituída por uma parede com escorregamento (*slip*). Fazendo esta alteração, a velocidade média da frente da corrente manteve-se praticamente inalterada, sendo que já não se verificou a recirculação referida. Assim, foi possível obter uma estrutura da corrente com maior semelhança às estruturas obtidas em [17], concluindo-se que uma grande parte das diferenças observadas têm origem nas fronteiras e nas condições de fronteira utilizadas. O efeito da superfície livre é estudado no capítulo seguinte.

4.2.1 Comparação entre resultados com e sem superfície livre

Para verificar o modelo numérico utilizado, fizeram-se simulações nas mesmas condições de [17]. No entanto, considerou-se útil e interessante fazer a sua comparação com simulações em que não se inclui superfície livre, isto é, o limite superior do domínio é uma parede rígida com escorregamento (*slip*). Como ambos os resultados foram obtidos numericamente, já é possível comparar um maior número de parâmetros, que não estavam disponíveis para comparação em [17].

Os parâmetros importantes de serem comparados são a velocidade da frente da corrente, perfis de velocidade em várias secções transversais do domínio, isolinhas de concentração e perfis de vorticidade. Refere-se à "simulação 1" como sendo a simulação com superfície livre e "simulação 2" como sendo a simulação sem superfície livre.

As simulações foram feitas num computador com processador AMD EPYC 7302P 16 core (16 CPUs), com frequência 3.0 GHz e com 65400 Mb de memória RAM. O tempo de cálculo para a simulação mais exigente (superfície livre) foi cerca de 19 horas.

Os gráficos apresentados encontram-se adimensionalizados para serem passíveis de comparação com outros casos. A adimensionalização das várias variáveis encontra-se explícita na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Adimensionalização das variáveis utilizadas.

Variável	Adimensionalização
t - tempo	$t\sqrt{g'H}/x_0$
u - velocidade	$u/\sqrt{g'H}$
y - coordenada vertical	y/y_0
x - coordenada horizontal	$(x_f - x_0)/x_0$

4.2.1.1 Estrutura da corrente

Na Figura 4.11 apresenta-se a estrutura da corrente para cada uma das simulações para o mesmo instante de tempo: 1, 2, 4, 8 e 15 segundos. Nas imagens em cima, que

dizem respeito à simulação 1, o domínio definido por $0,2 < y < 0,5$ [m] é constituído por ar. Nos instantes iniciais, ambos os casos são bastante semelhantes, quer nas instabilidades que acontecem na interface entre os fluidos quer na velocidade da corrente de densidade. No entanto, à medida que o escoamento se desenvolve, as diferenças tornam-se mais pronunciadas, como se observa na Figura 4.11d, e. A partir de $t \approx 8$ s começa-se a notar uma maior mistura a acontecer na simulação 1, principalmente na zona da cauda. Nesta zona, a corrente de fluido denso começa-se a dissipar, criando vorticidades de Kelvin-Helmholtz. Na simulação 2, a corrente de densidade permanece bastante mais intacta.

A Figura 4.12 mostra a forma que a corrente apresenta quando já se encontra completamente desenvolvida para as duas simulações. Ambas apresentam grande dissipação de energia na cauda, onde existe a formação de vorticidades e um elevado grau de mistura, observando-se novamente uma maior integridade da frente da corrente na simulação 2.

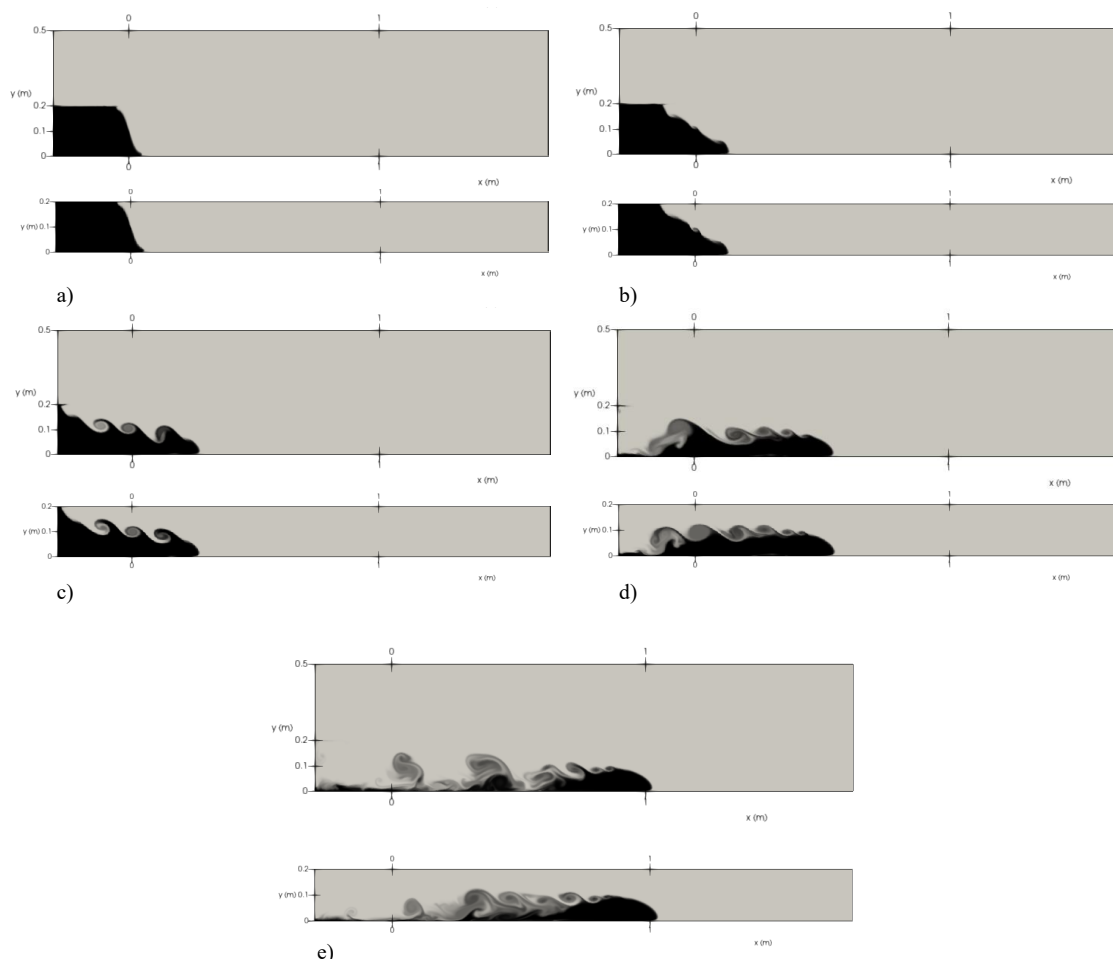


Figura 4.11: Estrutura da corrente observada com fluido denso representada a preto. a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s. Em cima os resultados da simulação 1 e em baixo os da simulação 2.

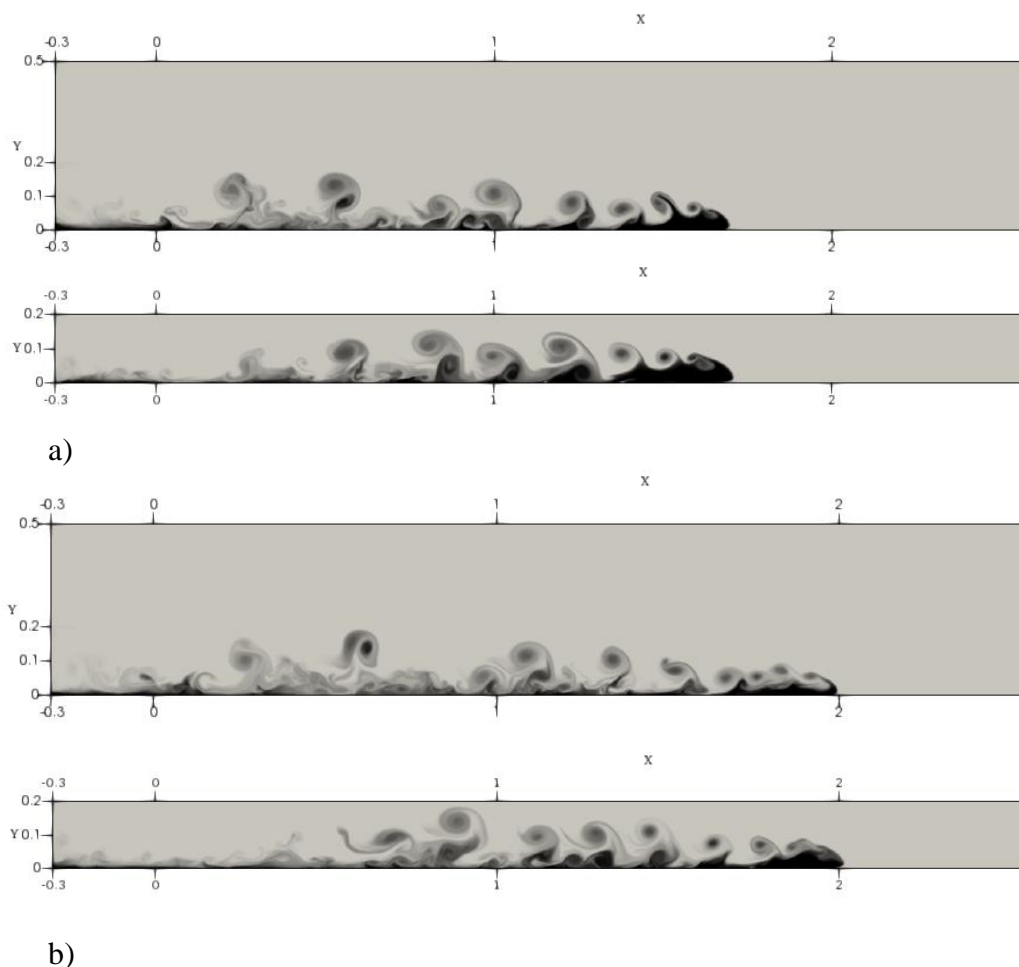


Figura 4.12: Corrente de densidade completamente desenvolvida para simulação 1 (em cima) e simulação 2 (em baixo). Altura y e comprimento x em metros. a) $t = 25s$; b) $t = 30s$.

4.2.1.2 Características da frente de corrente

Nas Figuras 4.11 e 4.12 é possível constatar que a velocidade da frente da corrente é bastante semelhante nos dois casos. Esta constatação é confirmada na Figura 4.13 e 4.14, onde se indica a evolução da posição da frente da corrente e da sua velocidade em função do tempo. É possível observar um ligeiro atraso da frente da corrente a acontecer no caso em que existe superfície livre (SL), marcado a vermelho na Figura 4.13.

No entanto, apesar de ambas as simulações apresentarem a velocidade média da frente da corrente semelhante, a Figura 4.14 evidencia uma diferença na evolução da velocidade. Para o caso com superfície livre, existe uma grande oscilação do valor da velocidade em torno de um valor médio de 0,45, valor observado por [17]. Pelo contrário, no caso sem superfície livre a velocidade é aproximadamente constante nesse mesmo valor. Em $t_{ad} \approx 15$ nota-se um decaimento da velocidade de acordo com a lei de potência $t^{-1/3}$ observada para a fase inercial.

A Figura 4.15 mostra os perfis verticais de velocidade das componentes verticais e

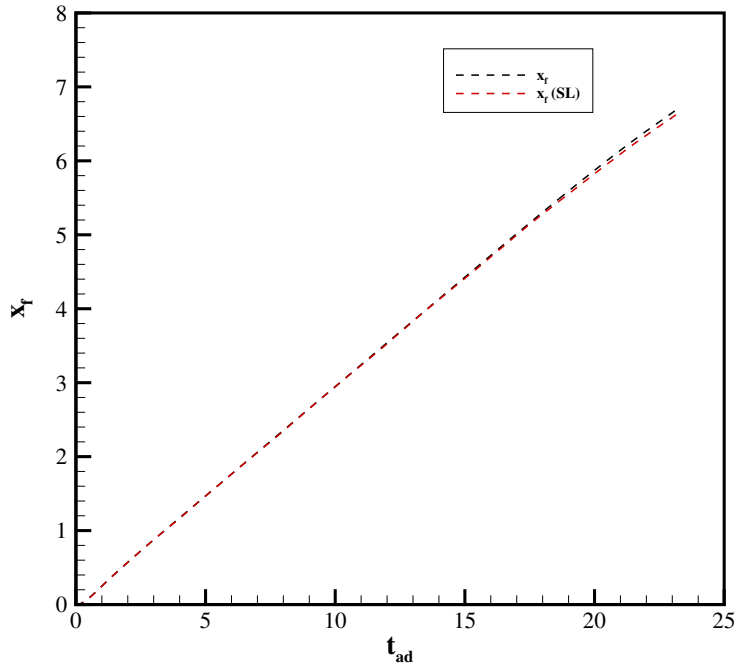


Figura 4.13: Evolução temporal da posição da frente da corrente para a simulação 1 e para a simulação 2.

longitudinais x e y , numa zona da frente da corrente para vários instantes de tempo. Verifica-se novamente a velocidade da frente com o valor de 0,45 em $y > 0,05$ para instantes iniciais. Como seria expectável, a velocidade apresenta um forte gradiente perto da parede do fundo definida como parede rígida sem escorregamento, crescendo de forma aproximadamente linear até ao valor máximo. À medida que aumenta a distância ao fundo, em $0,2 < y^* < 0,4$, existe um grande decréscimo da velocidade até esta atingir valores negativos, representando o fluxo de fluido ambiente com sentido contrário ao da corrente. Relativamente à velocidade na direção vertical, observa-se que à medida que se se aproxima da interface entre o fluido denso e o fluido ambiente, existe um aumento da velocidade na direção y para valores positivos, o que indica um aumento das forças de impulsão causadas no fluido ambiente. Nos instantes iniciais, verifica-se que a velocidade em y (U_y) se mantém com valor nulo na gama de valores de y em que a corrente apresenta o seu valor máximo de velocidade na direção x . Este efeito não acontece para os instantes finais, onde a velocidade em y rapidamente toma valores positivos, representando possíveis efeitos de mistura que provocam valores elevados de forças de impulsão no interior da corrente.

Para os vários instantes de tempo, existem variações no valor máximo da velocidade (Figura 4.14), sendo que por vezes podem ter sido seleccionados instantes que correspondem a variações negativas ou positivas do valor obtido para a simulação sem superfície

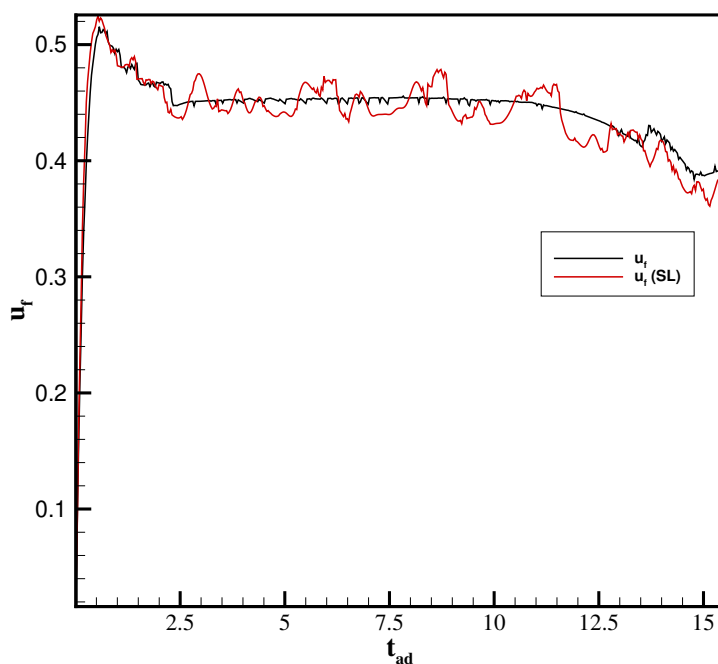


Figura 4.14: Evolução temporal da velocidade da frente da corrente para a simulação 1 e para a simulação 2

livre. No instantes finais representados (Figura 4.15e, f), nota-se uma perda da simetria da corrente verificada na Figura 4.15a, b, c e d, juntamente com uma degradação da estrutura inicial da corrente. A diferença verificada na altura da corrente aos 8, 10 e 25 segundos é consequência da alta sensibilidade do perfil de velocidade face ao comprimento x a que este foi medido (a não concordância verificada deve-se a diferenças de milímetros na abscissa em que o perfil foi retirado). Assim, esta diferença não tem significado físico relevante.

A comparação entre os perfis obtidos com SL (superfície livre) e sem SL mostra geralmente uma menor velocidade obtida para os casos com SL. No entanto, os resultados são bastante semelhantes nos instantes iniciais. Para instantes de tempo acima dos 20 segundos, começam-se a evidenciar algumas diferenças no que toca aos perfis de velocidade na zona da frente da corrente.

Ao analisar a magnitude da vorticidade em diferentes instantes de tempo, é fácil identificar um máximo atingido na metade superior da frente da corrente, próximo da interface entre os dois líquidos, como se demonstra na Figura 4.16. O valor mais elevado é verificado no caso com superfície livre na generalidade dos casos. Por vezes, nota-se este máximo a ocorrer em alturas diferentes para os dois casos, que se deve essencialmente à grande sensibilidade dos resultados face à abscissa em que são medidos (diferença na

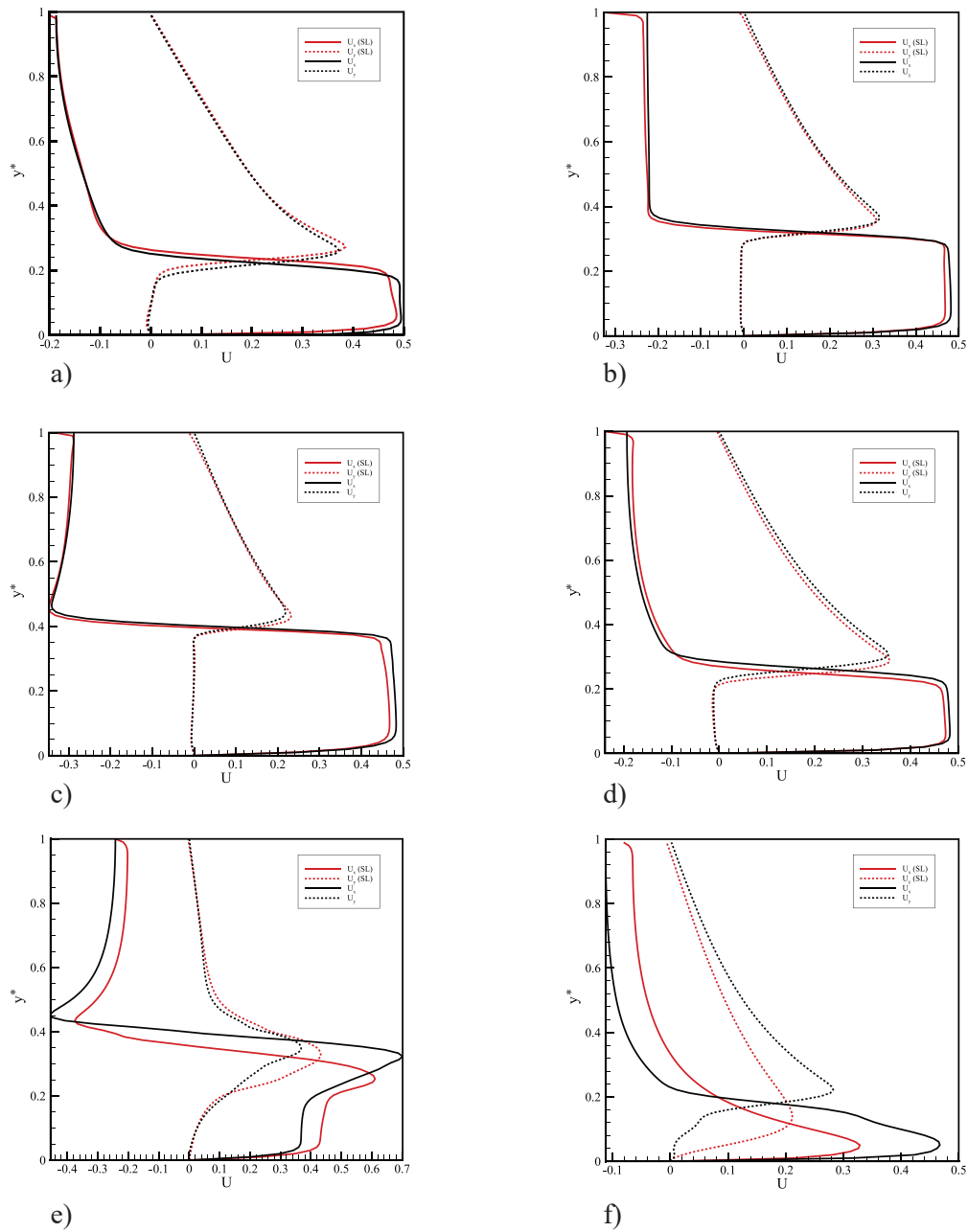


Figura 4.15: Perfis de velocidade na direção de propagação da corrente e na direção perpendicular a esta em vários instantes de tempo, numa mesma zona da frente da corrente: a) $t = 4s$; b) $t = 8s$; c) $t = 10s$; d) $t = 15s$; e) $t = 25s$; f) $t = 30s$.

ordem dos milímetros pode gerar uma diferença como a verificada nas imagens). A conclusão a retirar destes resultados reside fortemente no facto de ser no caso com superfície livre aquele onde se verifica os valores mais elevados de vorticidade.

Conclui-se que a presença de superfície livre tem uma influência bastante notável ao nível da mistura que acontece entre os fluidos, a nível do comportamento da velocidade da frente da corrente e do comportamento da estrutura em si. Com a existência de superfície

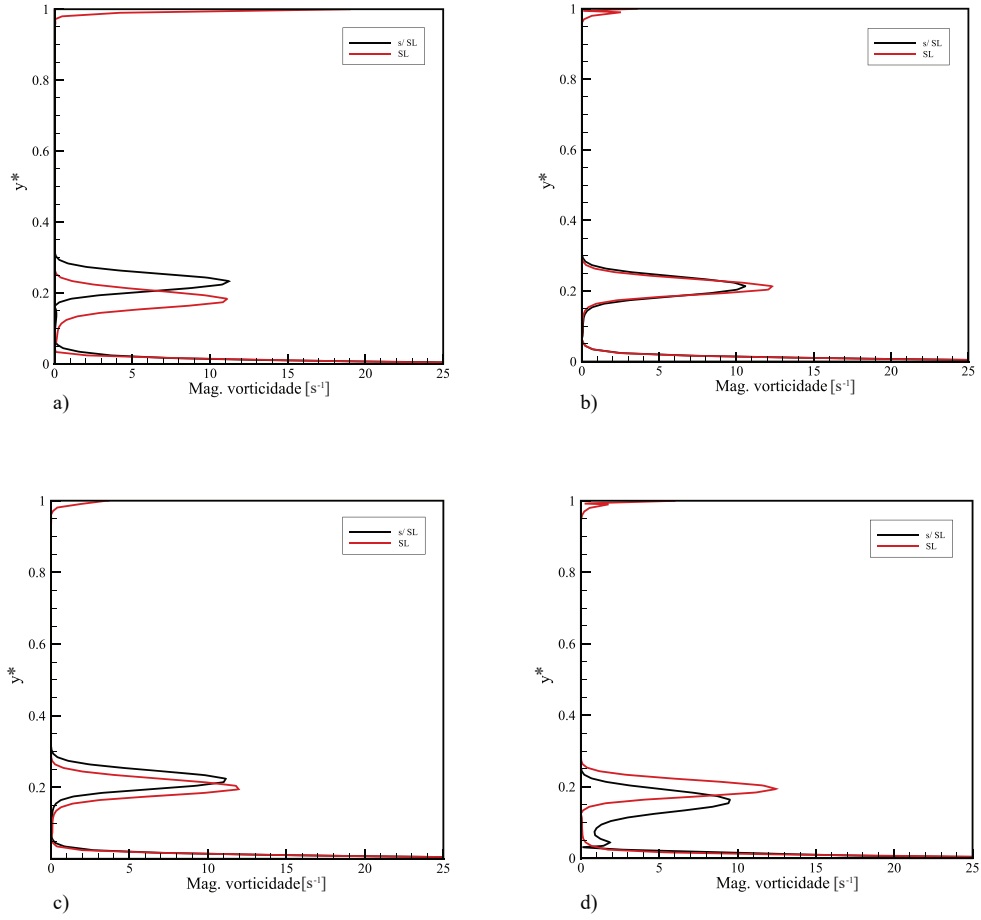


Figura 4.16: Perfis de magnitude de vorticidade em vários instantes de tempo, numa mesma zona da frente da corrente: a) $t = 4s$; b) $t = 8s$; c) $t = 15s$; d) $t = 25s$.

livre, verifica-se um maior grau de mistura e menor integridade da frente da corrente, consequência da maior magnitude de vorticidade observada próximo da interface dos fluidos. Já a velocidade da frente mostra-se menor e com maiores oscilações em torno do valor que se obtém sem SL.

4.3 Resolução da malha perto da parede

A utilização do modelo LES requer um tratamento da malha bastante rigoroso perto de paredes com condição de não escorregamento, de modo a permitir o correto cálculo da camada limite turbulenta. Neste sentido, o primeiro elemento (a partir da parede) tem que pertencer à sub-camada viscosa da camada limite e a velocidade verificada neste elemento deve respeitar as condições ditas em 4.3-4.4.

$$y^+ < 10 \rightarrow \frac{u_1}{u_\tau} = y^+ \quad (4.1)$$

$$y^+ = \frac{u_\tau \Delta z}{\mu} \quad (4.2)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}} \quad (4.3)$$

$$\tau_p = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \bigg|_{wall} \quad (4.4)$$

u_1 representa a velocidade no primeiro elemento (a partir da parede), y^+ é a distância da parede adimensional, Δz é a altura do primeiro elemento adjacente à parede, τ_p é a tensão de corte na parede e u_τ é a velocidade associada a essa tensão de corte.

É possível ainda avaliar qual a altura média do primeiro elemento necessária para este se inserir na sub-camada viscosa através da integração da Equação 4.5.

$$\Delta z_{1,x} = \sqrt{\frac{0,0577}{2} \frac{y^+ \nu}{U} Re_x^{1/10}} \quad (4.5)$$

$$\Delta z_{1,med} = \frac{1}{L} \int \Delta z_x dx = \frac{10}{11} \Delta z_{1,L} \quad (4.6)$$

Optou-se por tentar obter um valor de y^+ abaixo de 1 ao longo de todo o comprimento do canal com uma malha que fosse suficientemente refinada para se aproximar dos resultados obtidos por [17]. É aconselhado por [40] que existam entre 10 e 30 elementos na camada $0 < y^+ < 100$ para se resolver corretamente a camada limite. Neste capítulo foram utilizadas malhas com dimensão máxima de elemento de 2 milímetros e com valores de y^+ obtidos entre 0 e 1. Na Figura 4.17 mostra-se os valores obtidos aos dez segundos de simulação para as duas últimas simulações referidas: 2D com e sem superfície livre. É possível concluir que existem pelo menos 10 elementos no intervalo de valores de y^+ considerados. Assim, é possível afirmar que a lei de parede é bem representada para o modelo numérico utilizado com malhas com elementos de dimensão máxima de 2 milímetros.

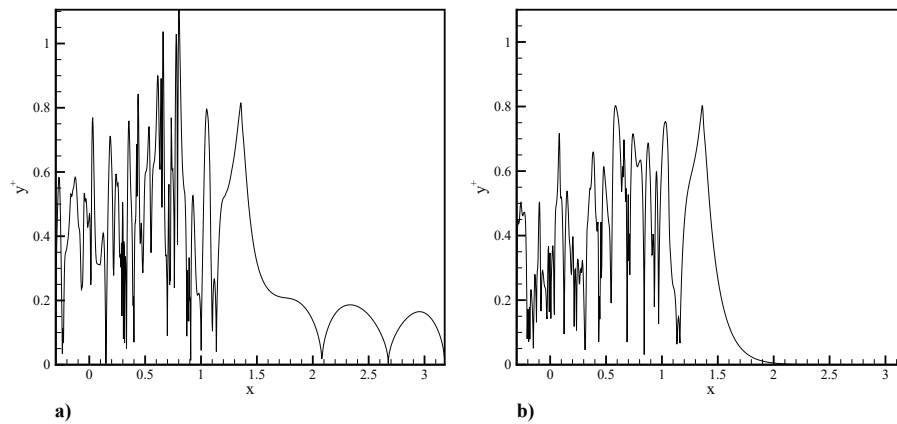


Figura 4.17: Valores de y^+ obtidos para a simulação: com superfície livre (a); sem superfície livre (b).

4.4 Códigos utilizados em pós-processamento

Através da técnica VOF, é possível determinar quais os elementos da malha que constituem a interface entre o fluido denso e o fluido ambiente. Tal informação é fornecida num ficheiro que regista um escalar entre 0 e 1, representando um elemento vazio ou preenchido por fluido denso, respetivamente. Os elementos que constituem a interface terão valores próximos de 0,5. Assim, extrai-se a posição de cada um desses elementos e seleciona-se aquele com maior valor (x_f) em cada instante de tempo. Este processo é realizado através de um código escrito em Matlab desenvolvido nesta dissertação, que exporta um ficheiro com as informações de posição e tempo, que pode ser analisado em Excel e/ou Tecplot.

A extração da posição de cada elemento é feita em pós-processamento com códigos desenvolvidos presentes no apêndice B. A seleção do elemento que pertence à frente da corrente para, posteriormente, retirar o valor da sua posição e velocidade é feito com os códigos presentes no apêndice A. Nas simulações com superfície livre, nomeadamente aquelas que têm o efeito do vento, foi necessário executar algumas alterações ao código para não serem gerados resultados erróneos.

TESTES NUMÉRICOS 2D E 3D E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Descrição dos testes numéricos

Nos testes numéricos pretende-se obter os dados necessários para se poder responder com precisão à seguinte pergunta “Como é que a vegetação e o vento interferem na propagação e troca de massa entre a corrente e o fluido ambiente?”. Neste âmbito, é necessário avaliar a influência dos parâmetros e características essenciais que definem o fenómeno, quando se insere a ação da vegetação e do vento. Tais características são passíveis de serem divididas em relação ao aspeto que definem: a corrente, o escoamento do vento e os parâmetros geométricos.

A corrente é caracterizada por:

- Fr (número de Froude) - representa a razão entre a inércia do escoamento e as forças externas (neste caso, a gravidade);
- Re (número de Reynolds) - representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas envolvidas no escoamento;
- Gr (número de Grashof) - representa a relação entre a sustentação de um fluido e a sua viscosidade.

Em relação ao escoamento induzido pelo vento, a sua caracterização é feita utilizando apenas o número de Reynolds. Já para a avaliação dos parâmetros geométricos tem-se:

- Fração volúmica dos cilindros (ϕ) - relação entre o volume ocupado pelos cilindros e o volume total;
- Re_d - Número de Reynolds dos cilindros;

- Dimensão do canal.

Para avaliar a influência destes parâmetros, existem quatro conjuntos de testes numéricos possíveis a realizar no âmbito do projeto *WinTherface* utilizando domínios diferentes explicitados na Tabela 5.1. Como se observa na Tabela 5.1, o número de testes a realizar

Tabela 5.1: Número de testes numéricos possíveis a realizar no âmbito do projeto *WinTherface*.

Teste	Número de testes possíveis de realizar
Efeito do vento sem cilindro (2D)	-
Cilindro isolado sem vento	24
Cilindro isolado com vento	24
Conjunto de cilindros sem vento	12
Conjunto de cilindros com vento	36

não é igual para todos os conjuntos. Este facto prende-se com as várias combinações de variáveis relevantes possíveis de fazer para cada caso.

Assim, as variáveis do problema são:

- ρ_0 - massa volúmica do fluido ambiente (variável fixa);
- S - espaçamento médio entre cilindros;
- V - velocidade do vento;
- D - diâmetro dos cilindros;
- H - altura dos fluido denso (variável fixa);
- h_S - altura da vegetação (variável fixa);
- ρ_1 - massa volúmica do fluido denso;
- x_0 - comprimento do reservatório de fluido denso (variável fixa);
- μ - viscosidade dinâmica (variável fixa).

A descrição das combinações das diferentes variáveis, bem como a demonstração do domínio utilizado dentro de cada tipo de teste será feita neste capítulo. As diferentes malhas utilizadas em cada um dos testes respeitam a dimensão máxima que os elementos poderão ter, de acordo com a validação feita no Capítulo 4. Neste capítulo é feita uma análise em pormenor do efeito do vento e da vegetação para várias condições iniciais.

5.2 Teste 2D com efeito do vento e sem vegetação

5.2.1 Preparação das simulações

O domínio utilizado para a realização dos testes numéricos que analisam a situação 2D do efeito do vento sem a presença de vegetação está representado na Figura 5.1. A origem do referencial está colocado no fundo do canal no final do reservatório de fluido denso (*lock*), sendo que o eixo y aponta na direção vertical e x na direção horizontal.

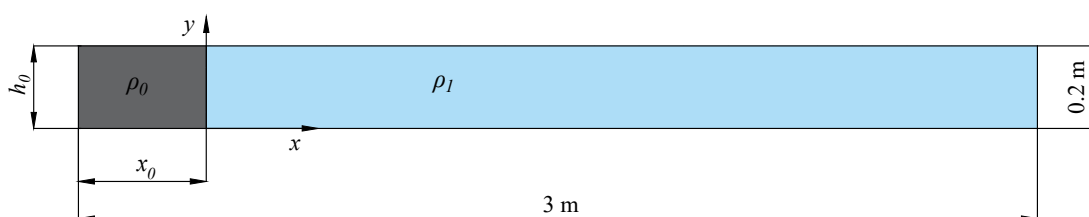


Figura 5.1: Esquema do domínio numérico 2D utilizado para o teste com efeito do vento sem vegetação.

A simulação será feita em 2D com o propósito de avaliar o efeito isolado do vento. Não existe a necessidade de realizar a simulação em 3D visto que as fronteiras podem ser definidas como condições de simetria, acabando por não invalidar o resultado final.

No entanto, para evitar a utilização excessiva de recursos computacionais, ao invés de se utilizar um perfil de velocidade para o vento, optou-se por colocar uma condição de fronteira de parede móvel no limite superior do domínio. Todas as superfícies sólidas à exceção da parede superior foram definidas como paredes sem escorregamento, sendo que as paredes paralelas ao plano xy foram definidas com uma condição de simetria.

Nesta secção, o principal objetivo é perceber a influência do vento na superfície e o seu impacto no comportamento da corrente de densidade. Neste sentido, serão analisadas velocidades diferentes da parede móvel, que representam diferentes condições de vento. Procurou-se utilizar velocidades comuns de vento e fazer a relação dos dois meios através do rácio denominado na literatura por "*wind factor*", u_s/V , sendo u_s a velocidade na superfície da água e V a velocidade do vento no infinito [20]. Este rácio é geralmente assumido como sendo 3% para corpos grandes de água como é o caso de um mar ou oceano, decrescendo até ao valor de 1,5% para pequenos reservatórios ou lagos, pelo que será utilizado este último valor. As velocidades estudadas e os respetivos números de Reynolds encontram-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valores de velocidade utilizadas nas simulações com efeito do vento.

Simulação	V	Re_U	u_s	Re_s	Regime
A	3,33 m/s = 12 km/h	37000	0,05 m/s	10000	Corrente
B/B'	6,67 m/s = 24 km/h	74000	0,1 m/s	20000	Corrente/Contra-corrente
C/C'	13,33 m/s = 48 km/h	148000	0,2 m/s	30000	Corrente/Contra-corrente
D/D'	33,33 m/s = 120 km/h	370000	0,5 m/s	75000	Corrente/Contra-corrente

As simulações foram realizadas num computador com Intel Core i5-6400 CPU 2.7GHz, gráfica NVIDIA GeForce GTX 1070 e 16GB RAM, tendo-se obtido um tempo médio de simulação de 9 horas.

5.2.2 Resultados e discussão

A organização deste capítulo passará por fazer a comparação com os resultados com superfície livre sem ação do vento, utilizando para tal o caso B, por ser o caso de referência nos testes do Capítulo 4. De seguida, será feita uma comparação entre as quatro simulações assinaladas na Tabela 5.2, no que toca ao desenvolvimento da estrutura e ao comportamento da frente da corrente. Por último, analisa-se o efeito do sentido do vento, utilizando a simulação B para comparar o teste em corrente com o teste em contra-corrente.

5.2.2.1 Vento em regime corrente

Na Figura 5.2 compara-se a simulação B (em baixo) com a simulação com superfície livre sem efeito do vento (em cima). As correntes formadas são bastante semelhantes entre

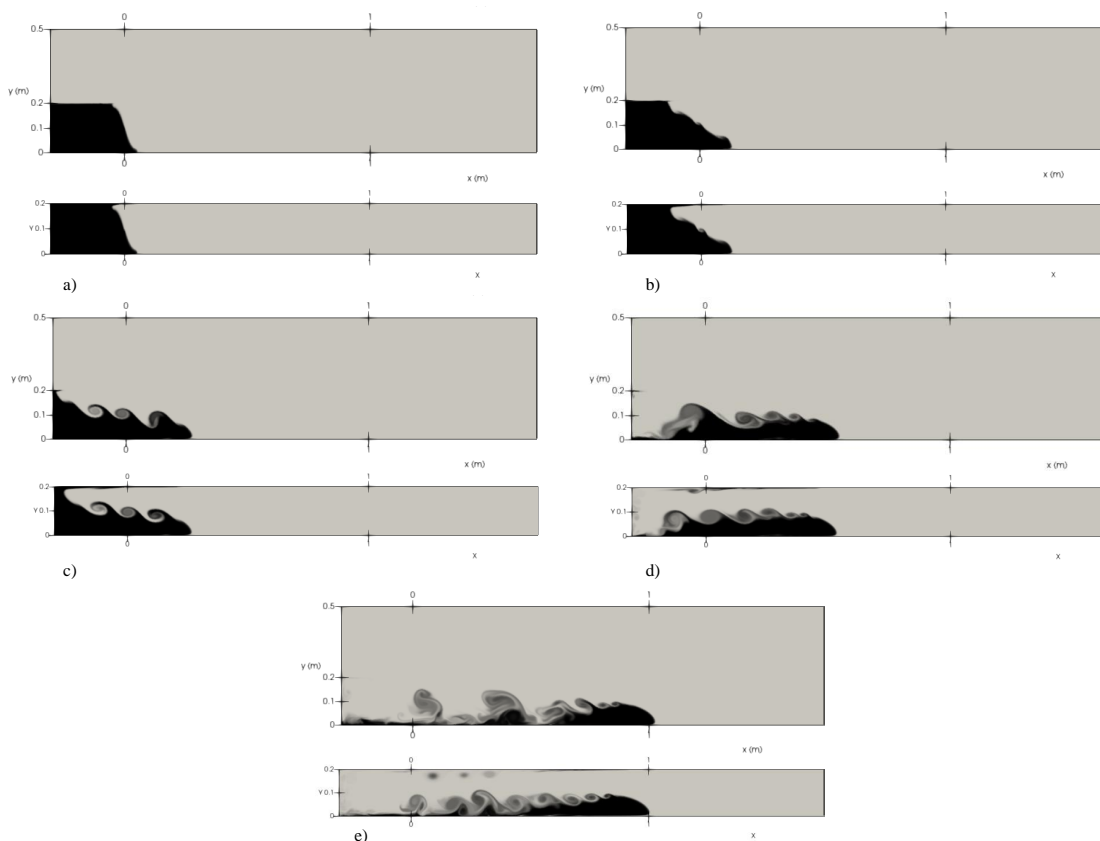


Figura 5.2: Estrutura da corrente de densidade com superfície livre sem efeito do vento (em cima) e com efeito do vento a 6,67 m/s (em baixo) na direção da propagação da corrente em vários instantes no tempo: a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.

si, embora exista arrastamento das camadas adjacentes à superfície na interface água-vento, observáveis logo a partir dos 2 s. Esta massa de fluido denso aderente à superfície pode acontecer devido a aspetos numéricos relacionados com a utilização da condição de parede móvel. No entanto, como todos os testes foram feitos sob as mesmas condições, as conclusões retiradas continuam a ser válidas. Aos 4 s, nota-se uma redução na vorticidade no caso em que existe influência do vento, sendo também visível aos 15 s sob a forma de uma estrutura mais compacta, cuja frente não se destaca fisicamente da cauda da corrente. A partir deste efeito conclui-se que o vento em sentido corrente reduz a mistura entre os dois fluidos. No que diz respeito à velocidade da frente da corrente, através da Figura 5.2 é possível aferir que o vento com direção corrente terá uma influência negativa (redução da velocidade média) na evolução da posição da frente em função do tempo.

Nos instantes finais da simulação B representados na Figura 5.3, a frente da corrente ainda está bastante delineada, mais do que na simulação com superfície livre sem vento. Na simulação B observa-se ainda que existe massa em suspensão nas camadas perto do topo do canal, o que não acontece quando não existe efeito do vento.

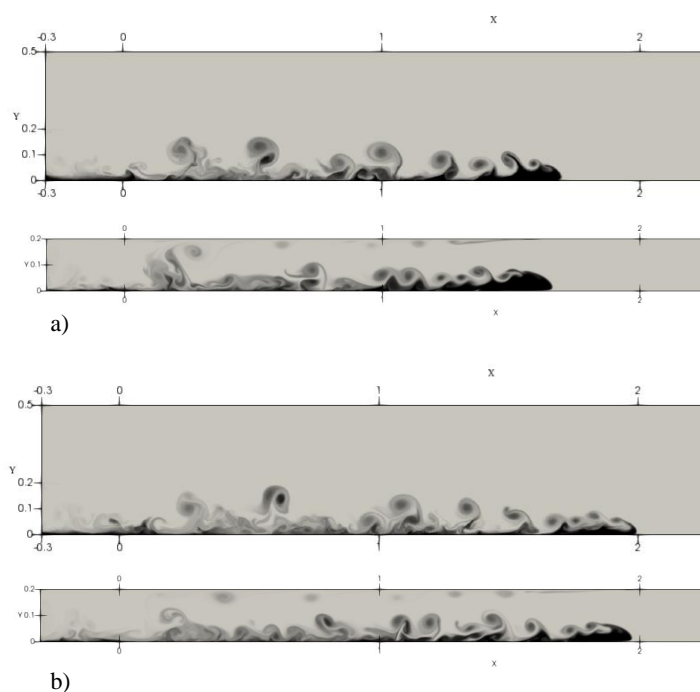


Figura 5.3: Corrente de densidade completamente desenvolvida para a simulação com superfície livre sem vento (em cima) e simulação B (em baixo). a) $t = 25$ s; b) $t = 30$ s.

As estruturas da corrente formadas nas simulações A e B são apresentadas na Figura 5.4. No caso da simulação A, tem-se o vento em escoamento de transição com um Reynolds de 10^4 , enquanto que na simulação B (que se tomará como caso de referência para efeitos de comparação) já possui um Reynolds mais elevado de cerca de 2×10^4 .

Apesar das duas estruturas parecerem bastante semelhantes, existem alguns pormenores que as distinguem. Na simulação B existe claramente mais arrasto das camadas de

fluido denso adjacentes à superfície livre, bastante visível na Figura 5.4c e d. Mais uma vez, a Figura 5.4 evidencia o efeito negativo do vento na velocidade da frente da corrente.

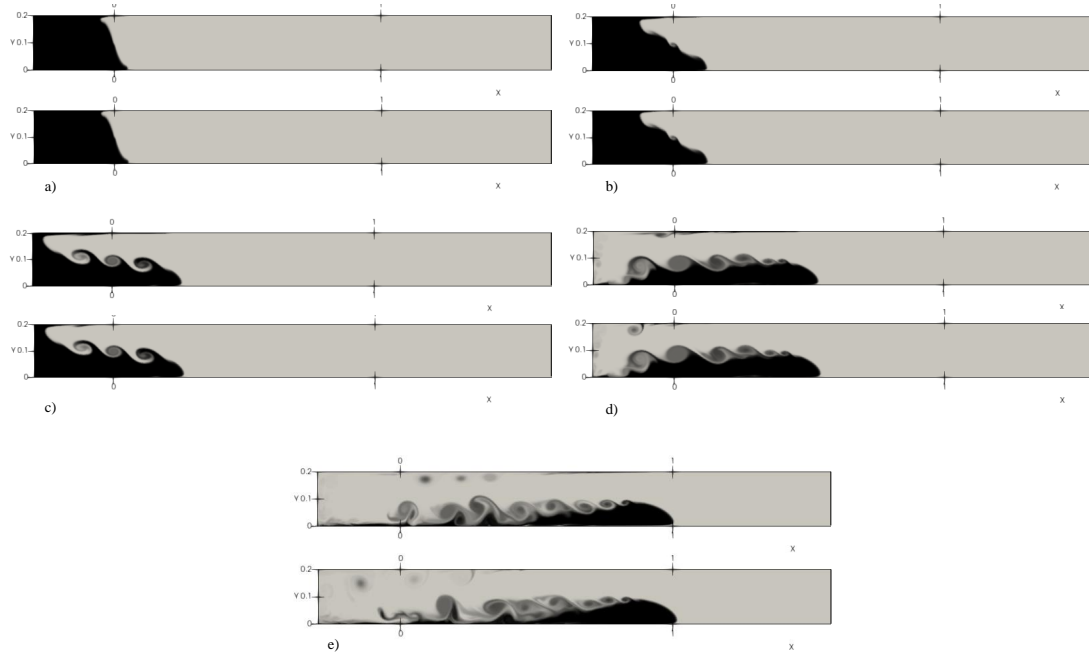


Figura 5.4: Estrutura da corrente de densidade da simulação B (em cima) e da simulação A (em baixo) na direção da propagação da corrente e em vários instantes no tempo: a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.

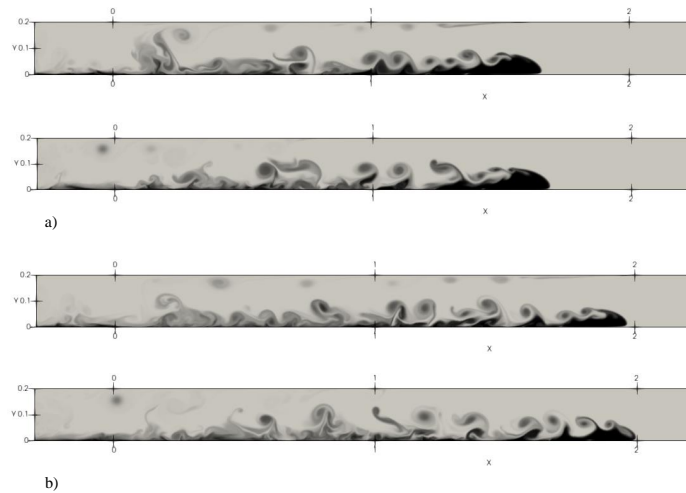


Figura 5.5: Corrente de densidade completamente desenvolvida para a simulação B (em cima) e A (em baixo). a) $t = 25$ s; b) $t = 30$ s.

Assim, é expectável uma corrente de densidade mais lenta na simulação C, o que de facto se verifica na Figura 5.6e. Com base nas várias comparações feitas, consegue-se observar um padrão na altura da frente da corrente. À medida que a velocidade do

vento com direção da corrente aumenta, a altura da frente da corrente tende a diminuir ligeiramente, adotando uma forma mais achatada.

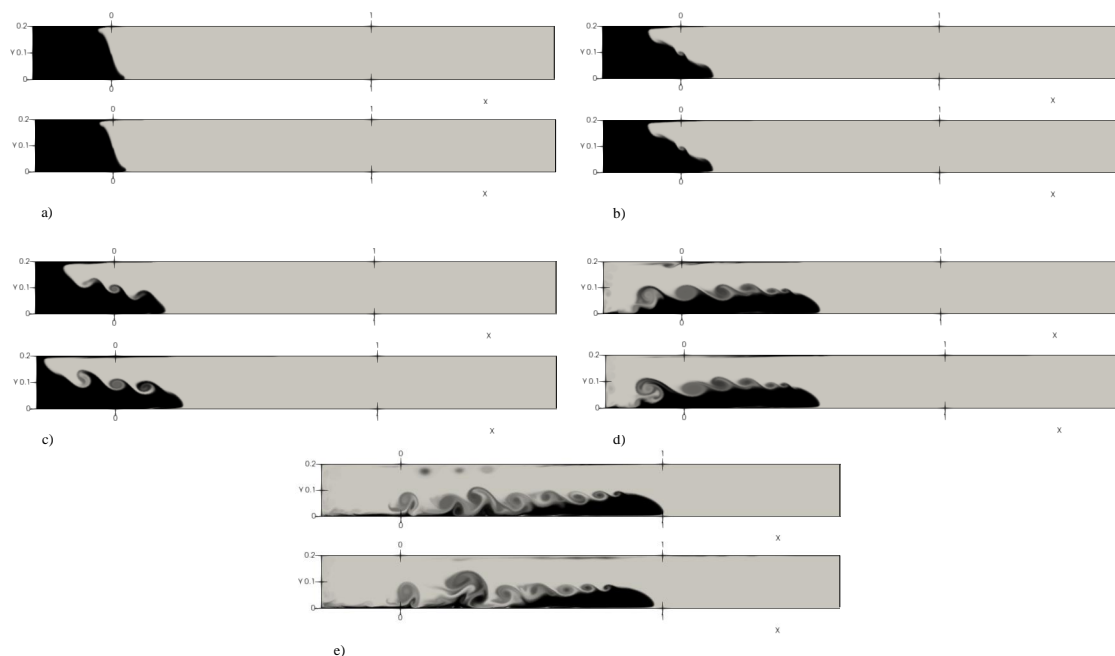


Figura 5.6: Estrutura da corrente de densidade da simulação B (em cima) e da simulação C (em baixo) na direção da propagação da corrente e em vários instantes no tempo: a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.

Para além das simulações referidas na Tabela 5.2, realizou-se ainda uma simulação D com a velocidade à superfície de 0,5 m/s, equivalente a ventos com 120 km/h, condições correspondentes a situações de tempestade. O objetivo desta simulação prende-se com a necessidade de ter um caso extremo para a comparação das velocidades das frentes das correntes. No entanto, para velocidades altas como é o caso da simulação C e desta simulação extra, é interessante avaliar os instantes finais através da Figura 5.7 e 5.8. A

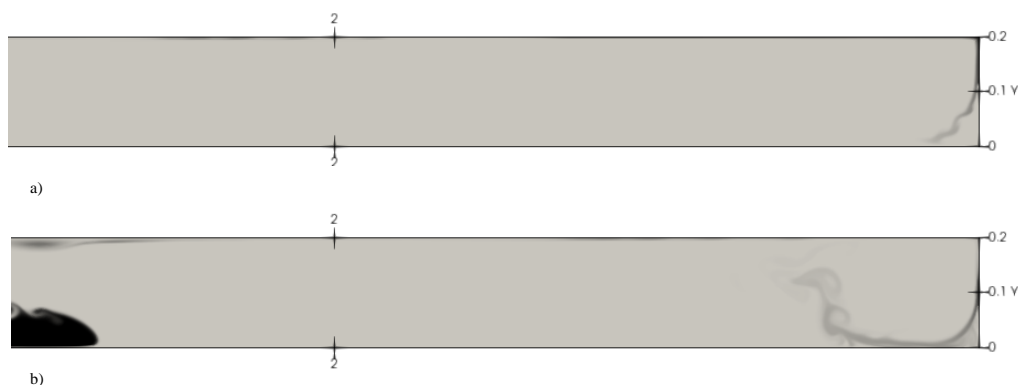


Figura 5.7: Estrutura da corrente de densidade da simulação C. a) $t = 20$ s; b) $t = 25$ s.

partir da velocidade de superfície de 0,2 m/s, a massa de fluido denso que é arrastada

pela superfície apresenta momento linear suficiente para atingir o final do canal. Posteriormente, esta massa acaba por descer até ao fundo do canal causando uma zona de recirculação. Assim, para velocidades elevadas e largos períodos de tempo de simulação, é aconselhável que o canal tenha um comprimento maior para evitar a influência desta recirculação no comportamento da corrente. Para o caso que se pretende estudar com esta dissertação, este fenómeno não é um obstáculo, visto que no tempo simulado a corrente de densidade não interage com esta corrente de retorno.

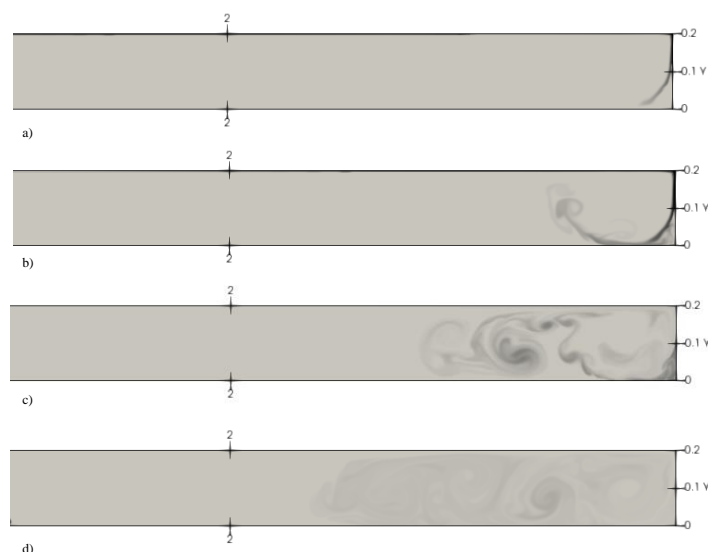


Figura 5.8: Estrutura da corrente de densidade da simulação D. a) $t = 8$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 15$ s; d) $t = 25$ s.

Para final confirmação da influência do vento na velocidade da frente de corrente, foi analisada a evolução da posição da frente ao longo do tempo para as várias simulações feitas na Figura 5.9. Como já deduzido, o aumento da velocidade do vento no sentido da corrente provoca uma redução da sua velocidade. O vento acaba por induzir uma rotação no escoamento no sentido horário que provoca a menor velocidade observada. Para contribuir também para esta redução, existe massa de fluido denso em suspensão perto da superfície, que representa uma diminuição na quantidade de movimento da corrente. Na curva correspondente à simulação D, começa-se a observar uma diminuição do declive perto dos instantes finais da simulação. Tal comportamento evidencia a transição da fase de queda para fase inercial. Pode existir um efeito mínimo da corrente de retorno gerada pela massa de fluido denso que é arrastada à superfície e que se desloca contra a corrente de densidade.

Para o cálculo da velocidade média de cada simulação foram ignorados os instantes iniciais (que dizem respeito à fase de aceleração da corrente) e os instantes finais para evitar utilizar fases do escoamento com aceleração diferente de zero. Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores obtidos. Retira-se que a relação entre a velocidade do vento e a velocidade da corrente não é inversamente proporcional, representando-se na Figura 5.16 a curva obtida

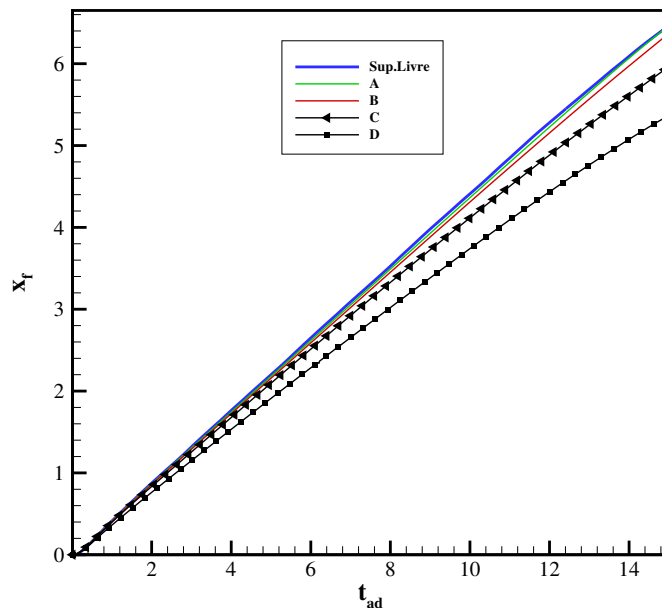


Figura 5.9: Evolução da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento com sentido da corrente de densidade.

com as várias simulações feitas (corrente e contra-corrente), que relaciona a velocidade transmitida pelo vento à superfície da água com a velocidade da frente da corrente de densidade. No entanto, apesar de ser apresentado um valor médio da velocidade, as várias

Tabela 5.3: Números de Froude resultantes de várias velocidades de vento no sentido da corrente de densidade.

Simulação	u_s	Fr.
Superfície Livre	0	0,450
A	0,05	0,442
B	0,1	0,438
C	0,2	0,425
D	0,5	0,387

correntes apresentam um comportamento com aceleração não nula a partir de instantes diferentes no tempo. Na Figura 5.10 apresenta-se a evolução da velocidade da frente de onda em função do tempo. Nos instantes iniciais o código de pós-processamento gerou algum ruído sem significado físico. Com o aumento da velocidade do vento, verifica-se que o escoamento apresenta uma aceleração negativa constante em $4 < t_{ad} < 12$, sendo já bastante denunciada na simulação D. Nos instantes finais, a aceleração já se apresenta como sendo variável e a decrescer (aumentar em valor absoluto).

Outro detalhe importante é a forma como a velocidade se comporta nos instantes iniciais, existindo uma aceleração bastante maior para o caso onde não existe influência do vento.

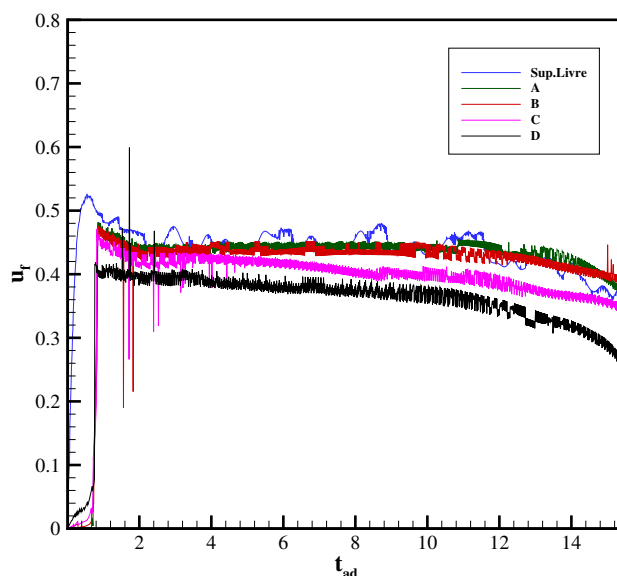


Figura 5.10: Evolução da velocidade da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento com sentido da corrente de densidade.

5.2.2.2 Vento em regime contra-corrente

Existe ainda na natureza a possibilidade de o vento circular na mesma direção mas com sentido oposto ao da propagação da corrente de densidade. Para estudar estas condições, procede-se da mesma forma, utilizando como caso central de comparação, a simulação B em contra-corrente (B').

Na Figura 5.11 compara-se os resultados da simulação com superfície livre com a simulação B'. Observa-se uma grande semelhança entre as duas simulações, em qualquer um dos instantes de tempo representados. Quando existe uma corrente de densidade a formar-se sem a presença de fatores externos, o fluido ambiente desloca-se no sentido inverso ao da corrente. Este fluxo acaba por chocar com a parede esquerda e desce, atingindo a cauda da corrente e tem alguma influência na sua propagação. O vento na direção contra-corrente vem aumentar este efeito, daí se observar uma maior velocidade atingida pela corrente quando existe o efeito do vento neste sentido.

Para confirmar esta última conclusão e como seria de esperar, verifica-se na Figura 5.12 que o vento obriga as camadas superiores de fluido denso a deslocarem-se em direção à parede esquerda, que acabam por descer e colidir com a cauda da corrente. Assim, nota-se na Figura 5.12d e na Figura 5.12e vórtices com uma forma ligeiramente diferente da observada na simulação B, que acabam por ser mais irregulares devido a essa nova corrente formada por ação do vento, atrás da cauda da corrente de densidade. Tal fenómeno fornece mais momento linear à corrente, o que resulta numa maior velocidade da corrente de densidade. Na simulação em que o vento avança na direção contra-corrente

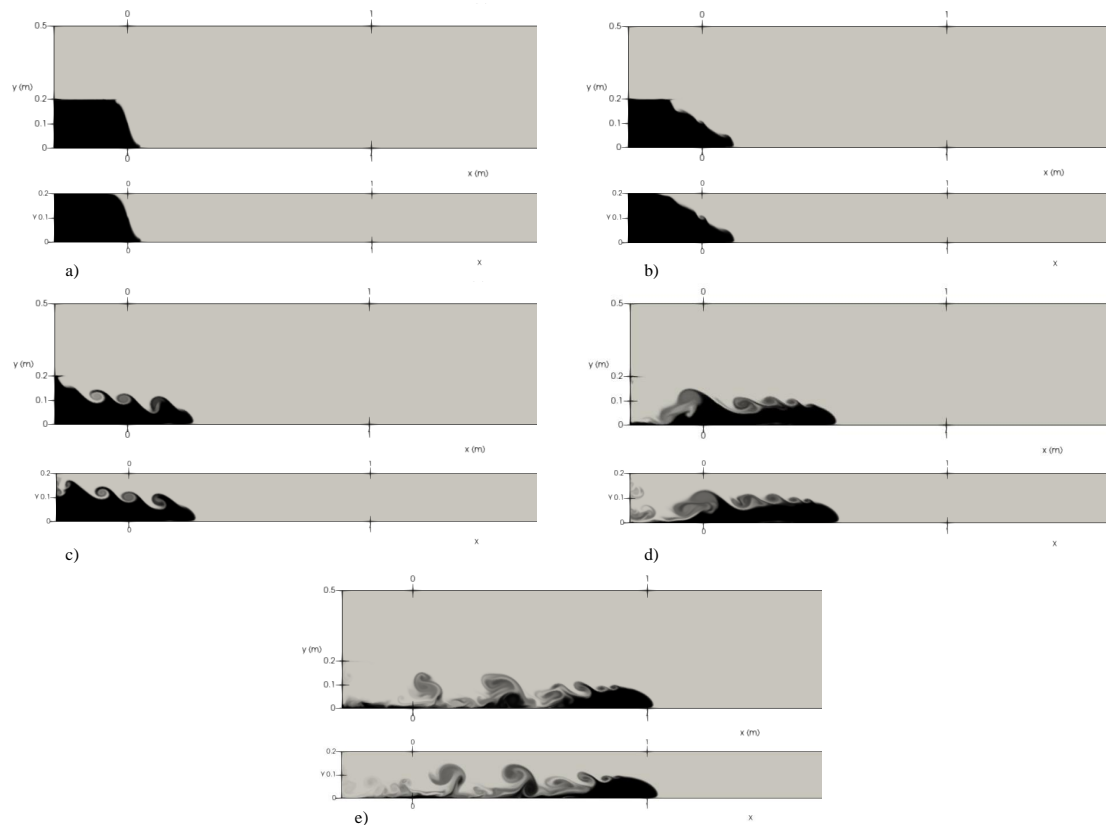


Figura 5.11: Estrutura da corrente de densidade com superfície livre (em cima) e em regime contra-corrente (em baixo). a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.

Tabela 5.4: Números de Froude resultantes de várias velocidades de vento em regime de contra-corrente.

Simulação	u_s	Fr.
Superfície Livre	0	0,450
B'	-0,1	0,452
C'	-0,2	0,464
D'	-0,5	0,520

não se verifica o arrasto que se tem verificado na simulações A, B e C. Esta "situação" é verificada e confirmada pela Figura 5.13, onde se apresenta a corrente de densidade nos instantes finais da simulação.

Como já era de esperar, devido à observação da estrutura da corrente, verifica-se na Figura 5.14 que o aumento da intensidade do vento no sentido inverso da corrente induz um aumento da velocidade da frente da corrente. No entanto, esta relação não é diretamente proporcional e tem a forma representada na Figura 5.16. Semelhante ao caso do regime de corrente, o cálculo da velocidade média foi feito ignorando os instantes iniciais e finais da simulação. Assim, os resultados obtidos para o regime de contra-corrente estão representados na Tabela 5.4.

Apresenta-se na Figura 5.15 a evolução da velocidade da frente da corrente em função

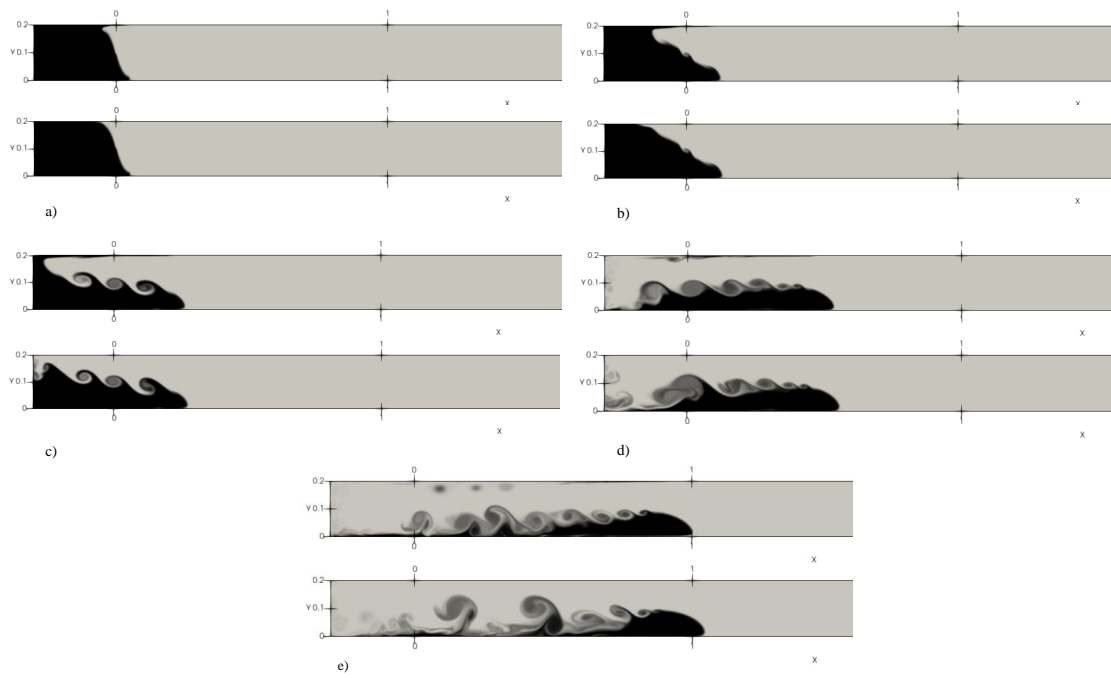


Figura 5.12: Estrutura da corrente de densidade da simulação B em regime corrente (em cima) e em regime contra-corrente (em baixo). a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s.

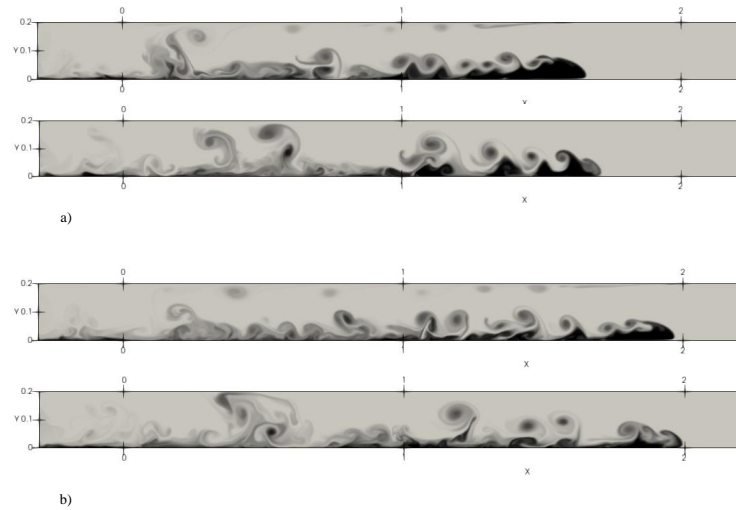


Figura 5.13: Estrutura da corrente de densidade completamente desenvolvida da simulação B em regime corrente (em cima) e em regime contra-corrente (em baixo). a) $t = 25$ s; b) $t = 30$ s.

do tempo. Tal como em regime de corrente, existe um período em que a aceleração é aproximadamente zero. No entanto, os instantes iniciais mostram um comportamento diferente daquele apresentado quando não existe vento. Quando existe vento, a velocidade da frente da corrente toma valores negativos, adquirindo depois uma elevada aceleração até atingir a fase de queda (velocidade aproximadamente constante). Tal como em regime

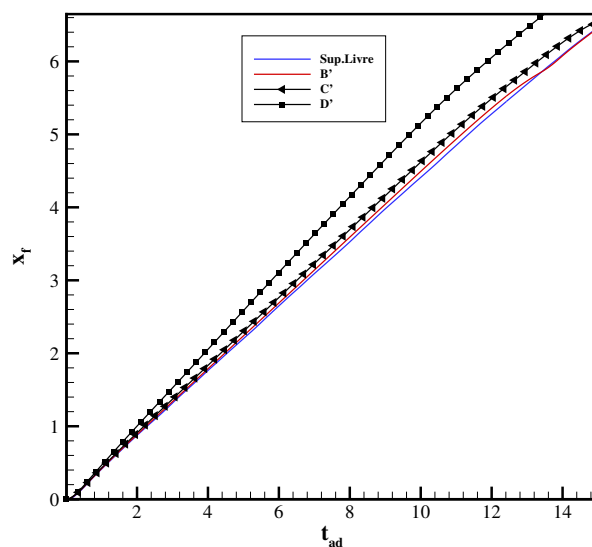


Figura 5.14: Evolução da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento em regime de contra-corrente.

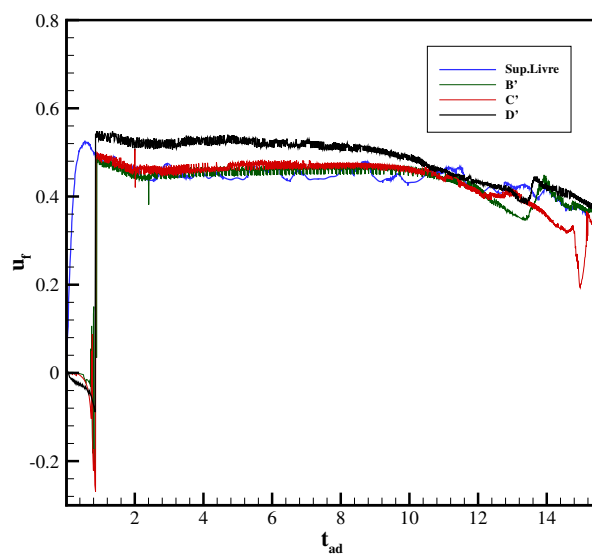


Figura 5.15: Evolução da velocidade da frente de corrente em função do tempo para as diferentes simulações feitas com influência do vento em regime de contra-corrente.

de corrente, nos instantes finais, a aceleração deixa de ser nula e passa a ser negativa. Como já se esperava, os valores para a simulação B', C' e D' são, na sua generalidade, mais elevados que os valores da simulação com superfície livre.

5.2.2.3 Velocidade média

Com base nos dados obtidos, é possível obter a relação entre a velocidade que o vento transmite à superfície da água e o número de Froude característico do escoamento (Figura 5.16). Os valores deste parâmetro irão sempre afastar-se do seu valor "tradicional" de 0,45 quando existe influência do vento. Para ser possível obter um gráfico mais completo e com menor erro, fizeram-se algumas simulações extra com os seguintes valores de velocidade à superfície da água: $-0,05$; $0,15$; $-0,15$; $0,3$; $-0,3$ m/s.

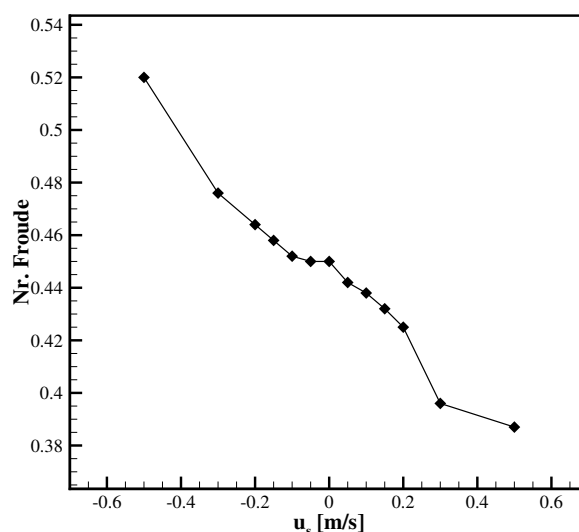


Figura 5.16: Evolução do número de Froude em função da velocidade transmitida pelo vento à superfície da água.

5.3 Teste 3D com cilindro isolado sem o efeito do vento

5.3.1 Preparação da simulação

O domínio utilizado para a realização dos testes numéricos que analisam a situação de cilindro isolado sem o efeito do vento está representado na Figura 5.17. A origem do referencial está colocado no centro e fundo do canal no final do reservatório de fluido denso (*lock*), sendo que o eixo do y aponta na direção vertical e o eixo do z aponta na direção transversal.

Em relação às condições de fronteira implementadas, todas as superfícies sólidas (com exceção da parede superior do canal) foram modeladas como paredes sem escorregamento. Na região superior do domínio utilizou-se a condição de escorregamento (*slip*).

O objetivo seria analisar a variação da gravidade reduzida (manifestando assim a influência da variação da densidade ρ_1), do diâmetro do cilindro e da distância, l , a que este encontra do final do *lock*. Apresenta-se na Tabela 5.5 os valores que cada variável

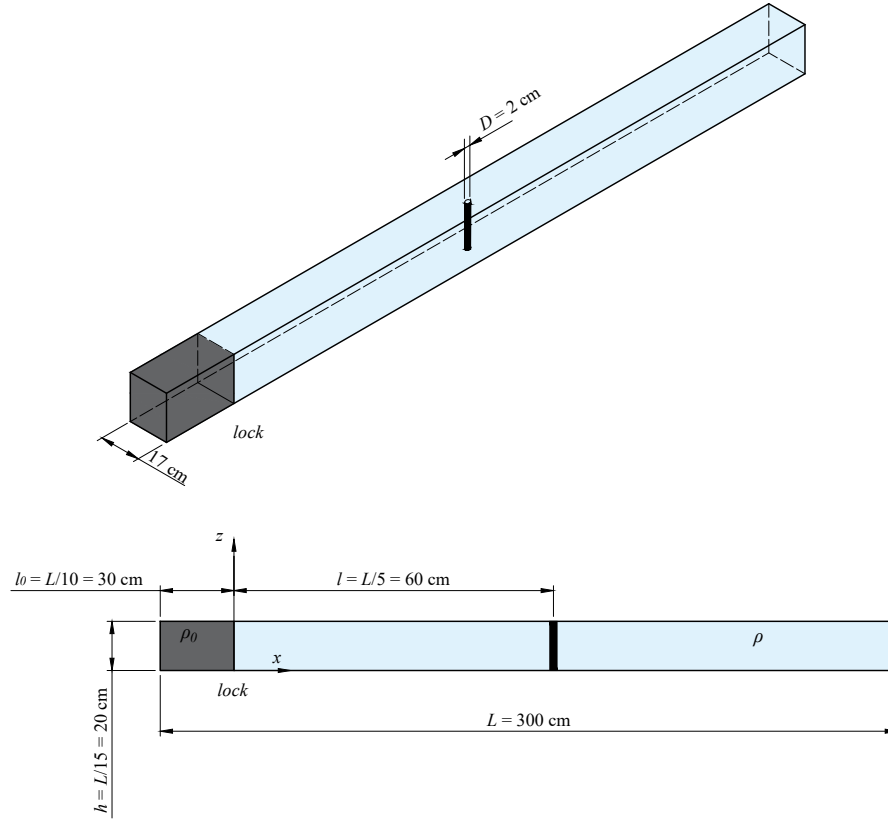


Figura 5.17: Esquema do domínio numérico utilizado para o teste do cilindro isolado.

pode tomar, representando um total de 24 combinações possíveis como já foi referido. No

Tabela 5.5: Testes possíveis para o caso de cilindro isolado sem ação do vento

Variáveis	Valores a considerar
$g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho}$	0,06; 0,12; 0,24; 0,48 $m \cdot s^{-2}$
D	2; 4; 6 cm
l	60; 90 cm

entanto, devido ao tempo necessário para realizar as simulações, apenas se considerou simular o caso com $D = 2 \text{ cm}$, $l = 60 \text{ cm}$ e $g' = 0,12 \text{ m} \cdot s^{-2}$.

5.3.2 Resultados e Discussão

Semelhante ao Capítulo 4, para caracterizar a corrente de densidade formada numa simulação com apenas um cilindro, representando uma fração volúmica (ϕ) de 0,002 num canal com 17 centímetros de largura, vão ser analisados cinco parâmetros essenciais:

- Estrutura da corrente;
- Evolução da posição da frente da corrente;
- Evolução da velocidade da frente da corrente;
- Perfil de velocidade e vorticidade;
- Arrasto no cilindro.

Na Figura 5.18 apresenta-se a evolução da estrutura da corrente ao longo do tempo através de uma vista lateral (através de um plano vertical coincidente com a parede), onde se encontra representado o cilindro. Como seria de esperar, a estrutura mantém a sua forma tradicional durante todo o desenvolvimento da corrente.

Na Figura 5.20 apresenta-se a vista em perspectiva da estrutura da corrente em vários instantes, com a corrente a atingir o centro do cilindro perto dos 9 segundos. Durante um

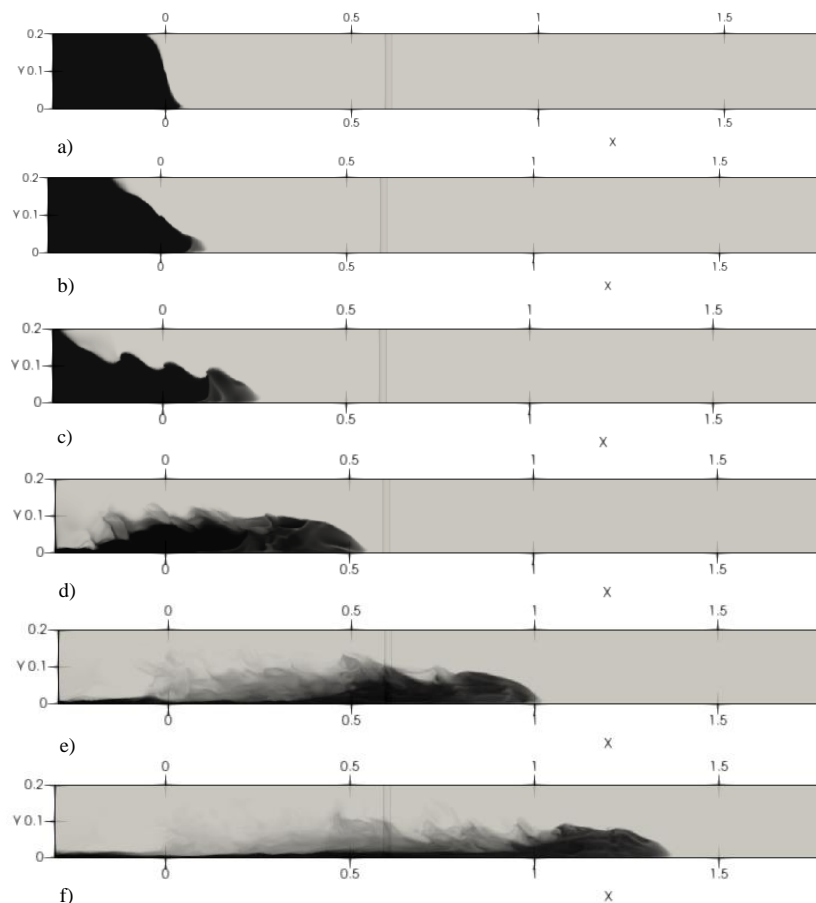


Figura 5.18: Vista lateral da estrutura da corrente observada com fluido denso representado a preto. a) $t = 1$ s; b) $t = 2$ s; c) $t = 4$ s; d) $t = 8$ s; e) $t = 15$ s; f) 20 s.

pequeno período de tempo, a zona interior da corrente é atrasada pelo cilindro, acabando por voltar a acompanhar a frente da corrente segundos mais tarde. No entanto, não é

possível detetar esse aspeto na Figura 5.20, pelo que se retira que a influência do cilindro no comportamento global da estrutura não parece ser relevante. No entanto, na Figura 5.18e observa-se uma aparente separação ou divisão da cabeça da corrente, que não se verificava no caso sem cilindro. Este aspeto é confirmado na Figura 5.20d.

A vista de corte da estrutura da corrente através dum plano horizontal que passa a 20% da altura do reservatório em vários instantes é apresentada na Figura 5.19. O cilindro está representado com um círculo branco. A escolha da altura em que o corte foi feito, baseia-se no facto de ser uma profundidade em que se verificam as velocidades máximas da frente da corrente, ao longo de todo o escoamento. Observa-se a formação de vórtices de Von-Kármán a partir da Figura 5.19c, claramente visíveis na imagem d, e. Após os 15 segundos, a frente da corrente já se encontra suficientemente afastada do cilindro, existindo uma menor intensidade de velocidade da corrente na zona próxima do cilindro e os vórtices falados acabam por dissipar.

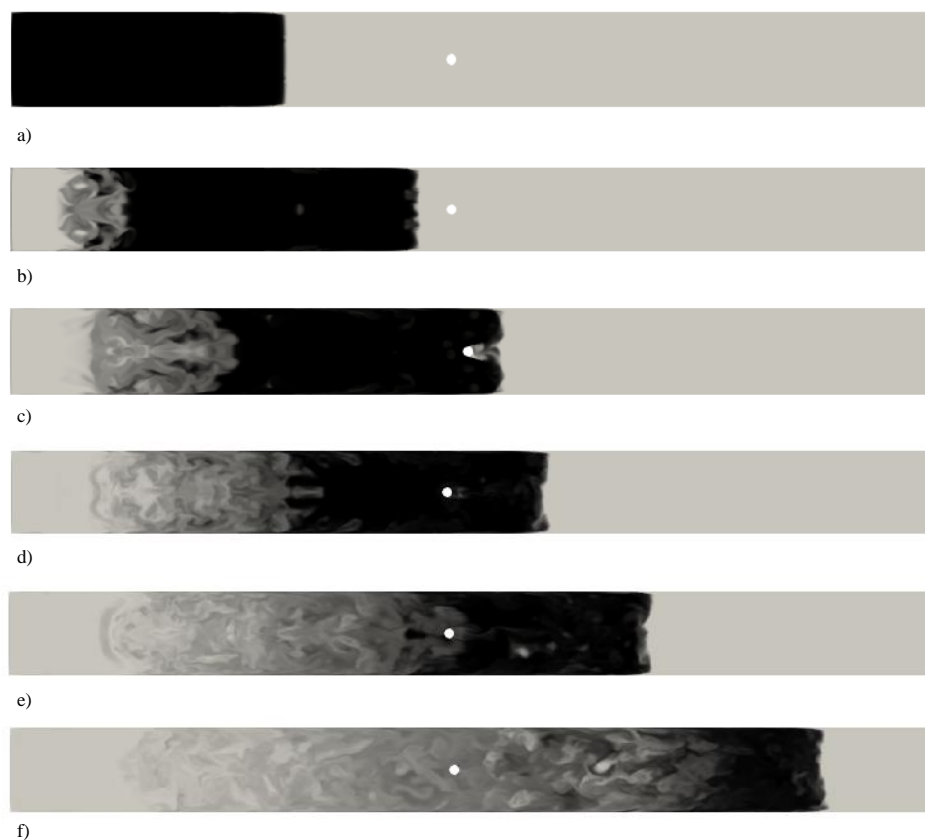


Figura 5.19: Vista de corte da estrutura da corrente observada com fluido denso representado a preto. a) $t = 4$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 10$ s; d) $t = 12$ s; e) $t = 15$ s; f) $t = 20$ s.

Nas Figuras 5.21 e 5.22 representa-se por uma linha a tracejado o instante em que a corrente atinge o cilindro. Pela forma como é medida a velocidade da frente da corrente (média na direção transversal), é possível afirmar que as camadas laterais do escoamento não são afetadas diretamente pela presença do cilindro, mantendo aproximadamente a

sua velocidade. As Figuras 5.21 e 5.22 representam a evolução da posição e da velocidade adimensional da frente da corrente em função do tempo adimensional.

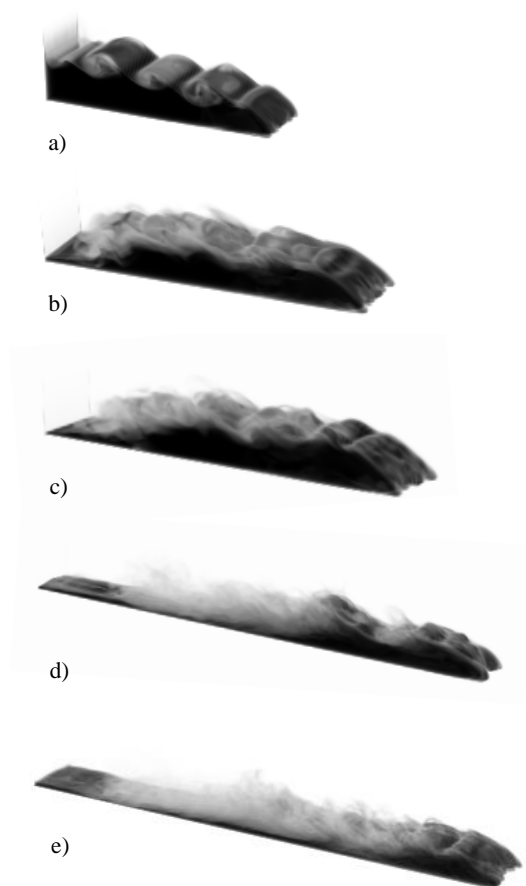


Figura 5.20: Vista em perspectiva da estrutura da corrente observada com fluido denso representado a preto. a) $t = 5$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 9$ s; d) $t = 15$ s; e) $t = 20$ s.

É ainda feita a sobreposição na Figura 5.21 com dados relativos à simulação 2D sem superfície livre apresentada no Capítulo 4. O facto de se estar a comparar resultados 2D com resultados 3D não é determinante nas diferenças que possam ser encontradas, visto que o carácter da corrente de densidade é essencialmente 2D. Para além deste aspeto, as simulações 2D foram feitas com condições laterais de simetria, pelo que acaba por se assemelhar a uma simulação 3D. Outra razão que explica as poucas diferenças e as grandes semelhanças é o facto de o parâmetro ϕ ser bastante reduzido (cerca de 0,2%).

Na Figura 5.22 é possível notar mais uma vez que a presença do cilindro não tem particular influência na velocidade média transversal da frente da corrente, visto que não tem diâmetro suficiente para afetar as camadas laterais da corrente. A velocidade tem um pico máximo em $t_{ad} = 0,6$, sendo que acaba por ter um valor médio constante de aproximadamente 0,455, o que representa um número de Reynolds de $Re_H \approx 14100$. Já

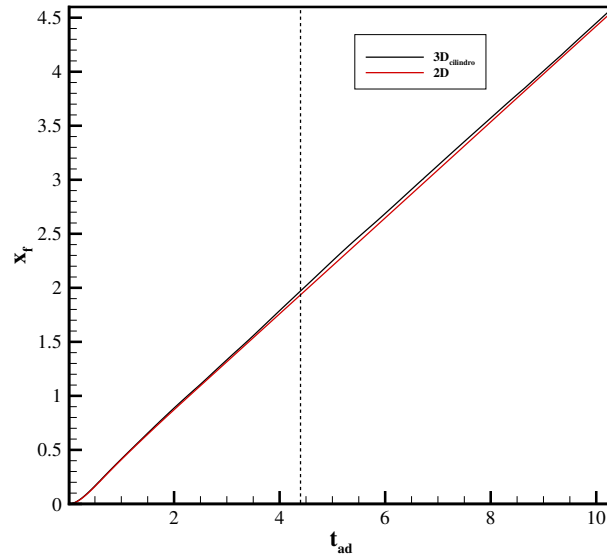


Figura 5.21: Evolução temporal da posição da frente da corrente da simulação 3D com cilindro e comparação com a simulação 2D sem cilindro.

em torno do cilindro, este parâmetro tem o valor de $Re_D \approx 1410$.

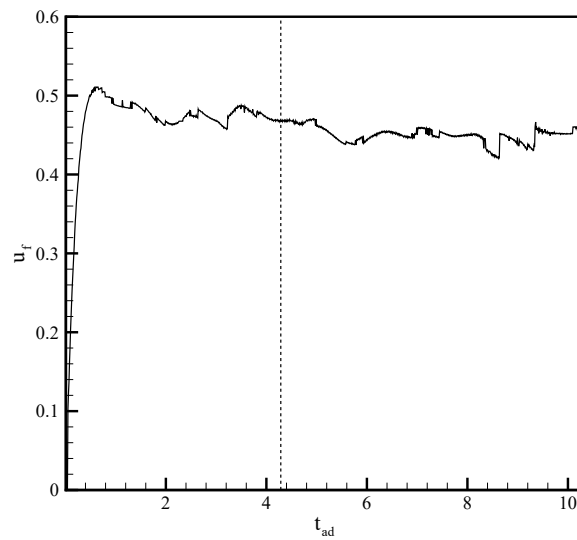


Figura 5.22: Evolução temporal da velocidade da frente da corrente da simulação 3D com cilindro.

Para analisar o comportamento da componente horizontal e vertical da velocidade ao longo da altura do canal, foram obtidos os perfis de velocidade em diversos instantes na zona da frente da corrente, apresentados na Figura 5.23. A interação com o cilindro acontece entre os 8 e os 9 s. As Figuras 5.23a e b representam instantes antes do contacto

com o cilindro e as Figuras 5.23c e d, depois do contacto com o cilindro. A partir do momento em que acontece o choque, a estrutura perde uniformidade na sua velocidade na direção horizontal e também na direção vertical.

[53] estudou em pormenor a influência do parâmetro ϕ , concluindo que quanto mais elevado for este parâmetro, menor é a velocidade horizontal, atingindo valor nulo, em casos com densidade de vegetação suficientemente elevada. Esta condição significa a supressão total da propagação longitudinal do escoamento.

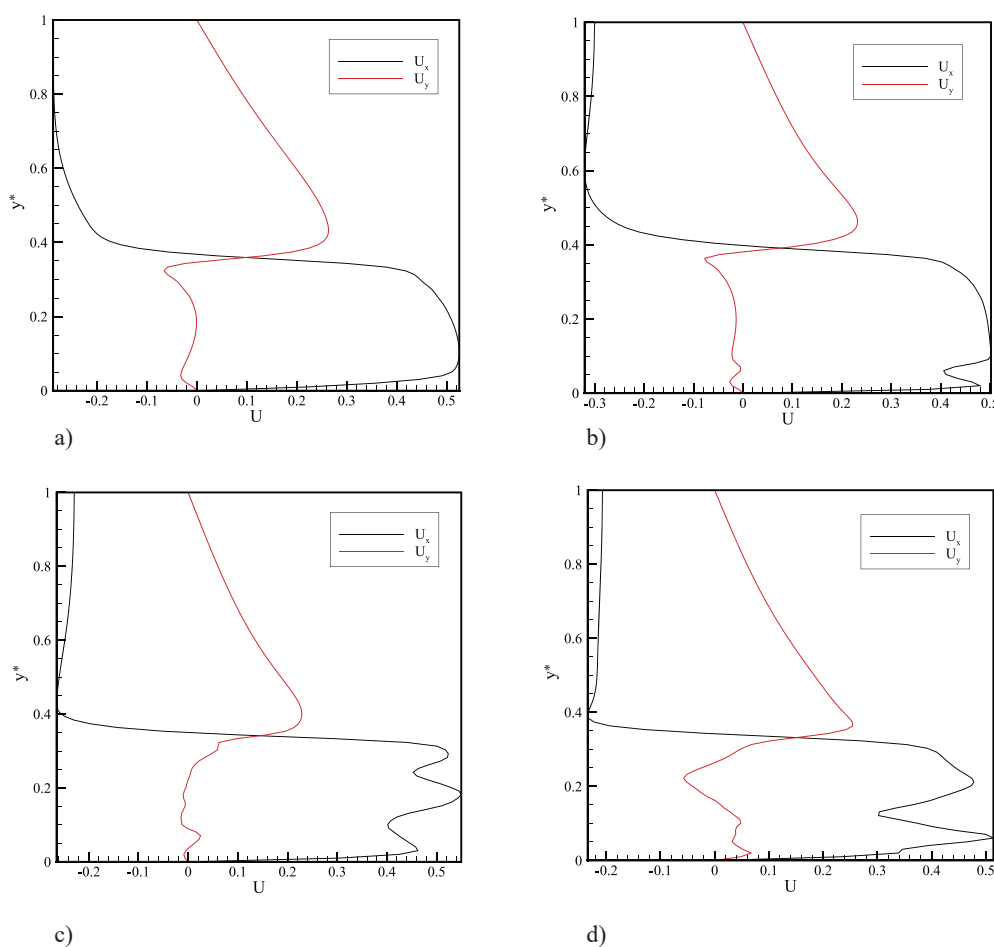


Figura 5.23: Perfis de velocidade na direção de propagação da corrente e na direção perpendicular a esta em vários instantes de tempo, na zona da frente da corrente: a) $t = 4$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 15$ s; d) $t = 20$ s.

O perfil de velocidades na direção da largura do canal (z) é também interessante de analisar na região do cilindro no instante em que a frente da corrente atinge o cilindro. Na Figura 5.24 apresentam-se os perfis de velocidades em quatro instante diferentes retirados sempre na zona da frente da corrente. Em $t = 9,5$ s, tem-se o momento em que a corrente ultrapassa o cilindro. Neste instante nota-se uma velocidade horizontal nula na zona central do canal. Estes valores indicam que irá ocorrer uma pequena recirculação de fluido denso desde as laterais do canal para a zona de baixa pressão criada a jusante

do cilindro. A Figura 5.24b mostra o momento depois do impacto, onde se observam oscilações na velocidade no interior do escoamento e o aparecimento de vorticidades maiores nessa zona. A partir de 3 segundos após o impacto, as camadas de fluido no interior do canal começam a acompanhar as camadas laterais (Figura 5.24c e d). Na última imagem, cerca de 40 centímetros afastado do centro do cilindro, a velocidade já se torna mais constante ao longo de toda a largura do canal.

Junto às paredes verifica-se velocidade nula com um gradiente elevado em direção ao centro do canal. Este aspecto deve-se à condição de não escorregamento definida nas paredes.

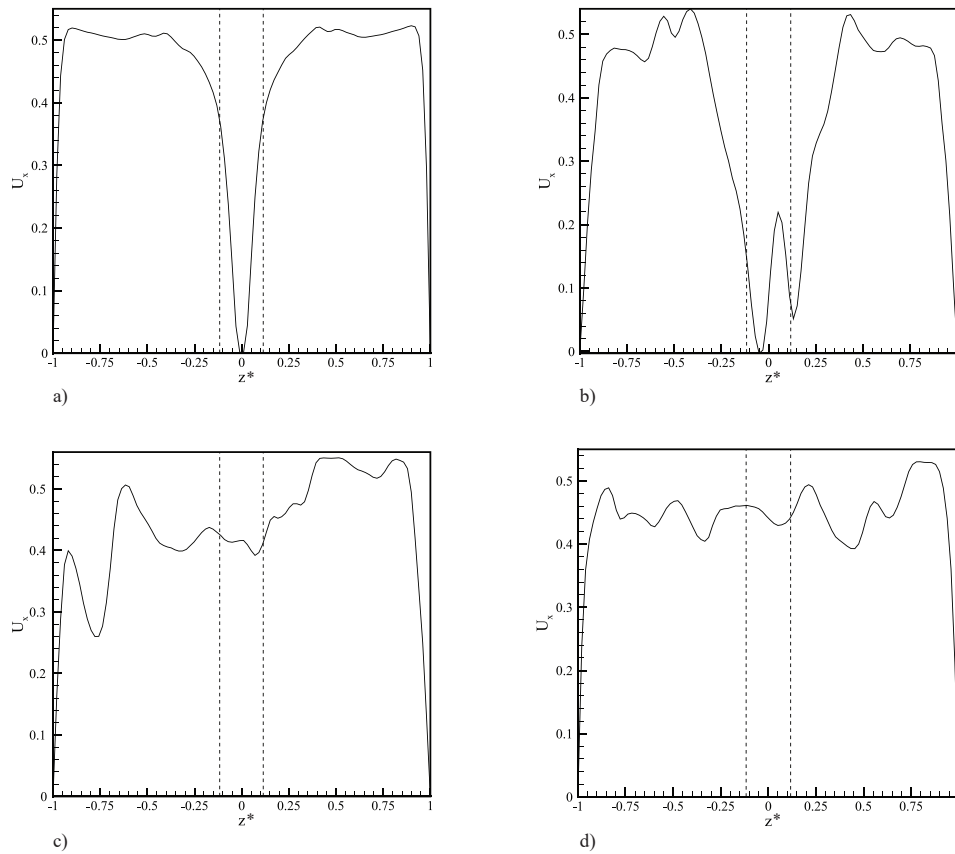


Figura 5.24: Perfis de velocidade na direção da largura do canal em vários instantes de tempo, na zona da frente da corrente: a) $t = 9,4$ s; b) $t = 10$ s; c) $t = 12$ s; d) $t = 15$ s.

Em relação à turbulência introduzida pelo cilindro, é possível quantificá-la através da representação de perfis de magnitude da vorticidade em função da altura adimensional y em instantes antes e depois da interação com o cilindro. Essa análise encontra-se na Figura 5.25, onde as primeiras duas figuras indicam instantes antes do impacto, e as restantes, após o impacto. Antes do impacto, os perfis são relativamente semelhantes aos observados na Figura 4.16. A partir de $t = 10$ s, o perfil sofre alterações mostrando um maior número

de picos de vorticidade à exceção daquele único pico que se tem observado nas simulações sem cilindro em regiões entre 20% e 40% da altura do canal. Assim, é possível afirmar que o cilindro introduz vórtices e, como tal, mais turbulência no campo do escoamento. Estes vórtices, embora perdendo intensidade, permanecem até pelo menos 10 s após o impacto.

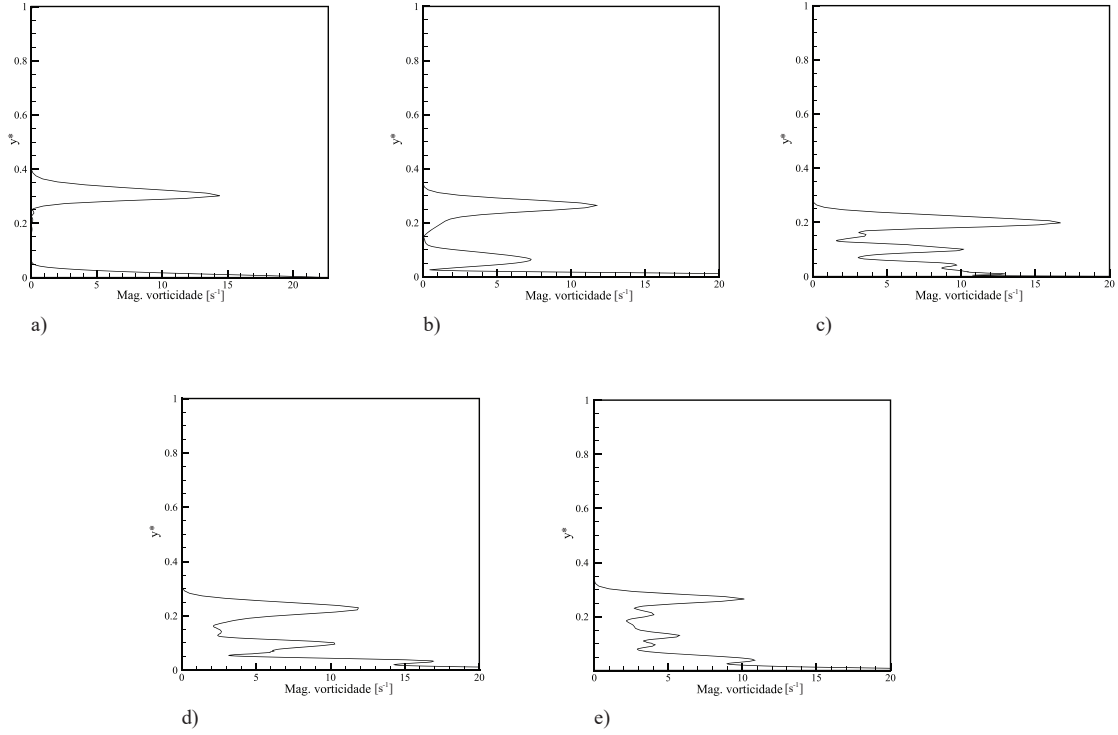


Figura 5.25: Perfis de magnitude de vorticidade em vários instantes de tempo, na mesma zona da frente da corrente: a) $t = 4$ s; b) $t = 8$ s; c) $t = 10$ s; d) $t = 12$ s; e) $t = 15$ s.

A força e o coeficiente de arrasto provocados no cilindro pelo escoamento estão representados na Figura 5.27. No eixo vertical da esquerda apresentam-se os valores da força de arrasto em unidades do sistema internacional e no eixo vertical da direita, os respectivos valores do coeficiente de arrasto. Para adimensionar os valores da força e obter os valores do coeficiente, foram utilizadas as variáveis $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ (massa volúmica), $u_f = 0,0705 \text{ m/s}$ (velocidade da frente da corrente) e $A = 6,28 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ (área superficial total do cilindro), segundo a Equação 5.1. Escolheu-se como densidade o valor de 1000 Kg/m^3 por ser o valor da massa volúmica do fluido ambiente. A velocidade foi retirada segundo a adimensionalização feita no Capítulo 4 e a área foi obtida através de um cálculo simples da área superficial de um cilindro.

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho U^2 A} \quad (5.1)$$

É interessante analisar o desenvolvimento da força e do coeficiente, dadas as suas grandes variações ao longo do tempo. No início do escoamento não existe ainda grande

influência da "abertura" da comporta, pelo que não se verifica qualquer arrasto até cerca dos 7 s de simulação. Neste momento, a corrente ainda não atingiu o cilindro mas já provocou o deslocamento de fluido ambiente das camadas superiores no sentido inverso, o que explica os valores negativos. No entanto, à medida que existe este deslocamento das camadas superiores, a corrente alcança o cilindro (9 s), que se traduz num equilíbrio das forças, provocando um momento no tempo com arrasto perto de zero (aproximadamente 11 s). Quando a corrente atinge o cilindro, cria-se uma zona de baixa pressão na frente

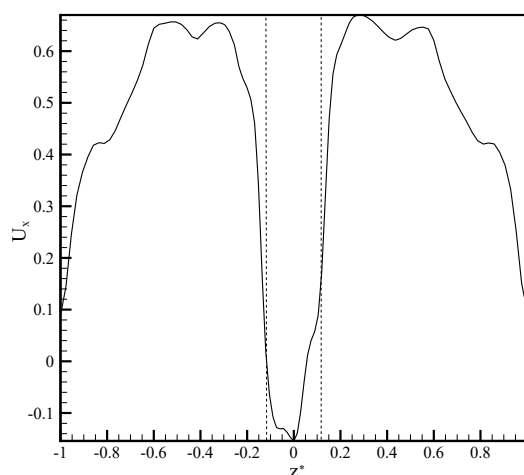


Figura 5.26: Perfil de velocidade na direção da largura do canal aos 12 segundos medido a uma altura de 20% da altura do canal a uma distância de 62 centímetros do final do reservatório de fluido denso.

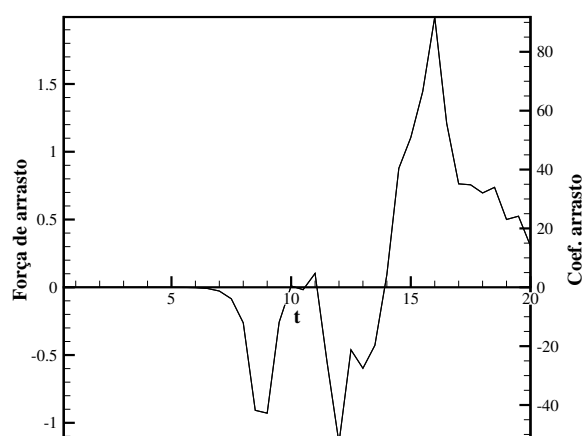


Figura 5.27: Força e coeficiente de arrasto no cilindro.

do cilindro e existe deslocamento de fluido denso das laterais para a zona central. Este

fluxo dá-se no sentido negativo da corrente como se observa na Figura 5.26, com valor negativo da velocidade, que se traduz num arrasto negativo.

A partir dos 14 s, esse efeito começa a perder intensidade e a corrente é a principal causa do arrasto, atingindo valores perto de 2 N. No final, a corrente começa a cessar e o arrasto diminui até se tornar, eventualmente, nulo.

Assim, é possível constatar que uma fração volúmica de 0,2% não é suficiente para causar alterações globais visíveis na corrente (com exceção da aparente separação/divisão da frente da corrente), quando comparado com o caso sem presença de cilindro, i.e., não existem alterações a nível das estruturas médias, nomeadamente da evolução da posição da frente da corrente e da velocidade. No entanto, a nível local próximo do cilindro, a sua presença provoca um aumento da vorticidade na frente da corrente e uma destabilização do perfil de velocidade na direção da largura do canal.

SÍNTESE DA INVESTIGAÇÃO E CONCLUSÕES

6.1 Síntese da investigação

Nesta dissertação foi feito um estudo numérico da dinâmica das correntes de gravidade geradas por diferenças de densidade entre dois fluidos, quando existe a presença do vento e vegetação. Pretendeu-se também avaliar a capacidade do *software* OpenFOAM para reproduzir este fenómeno complexo. Todos os resultados foram obtidos com o modelo de turbulência LES com o objetivo de avaliar a influência da presença do vento e da vegetação.

O estudo iniciou-se com a escolha dos parâmetros numéricos a utilizar e na adaptação do OpenFOAM para simular corretamente a formação de correntes de densidade. O estudo da influência da discretização da malha foi feita usando quatro malhas diferentes. Para esta fase, recorreu-se aos resultados experimentais de Hacker (1996) como base de comparação, nomeadamente aqueles referentes à experiência 2. De seguida foi feita uma verificação do modelo numérico através de testes feitos com a malha mais refinada nas condições das três experiências descritas em Hacker (1996), i.e. com os três rácios x_0/H . Para a verificação da influência da presença de superfície livre (que acaba por justificar a necessidade do estudo da influência do efeito do vento nas correntes de densidade) e servindo como prova adicional da robustez do modelo, fez-se ainda uma comparação entre um caso com e sem superfície livre. Foram analisados parâmetros como a evolução da posição e da velocidade da frente da corrente e da estrutura da corrente, perfis de velocidade e perfis de vorticidade.

Analisaram-se e quantificaram-se os efeitos dos agentes externos que influenciam o comportamento do escoamento: vento e vegetação. Fez-se uma análise 2D do efeito do vento, na qual se consideraram quatro velocidades diferentes de vento atuando em ambos os sentidos (corrente e contra-corrente), o que equivale a um total de oito simulações. Os

parâmetros analisados foram essencialmente os mesmos referidos anteriormente, com exceção dos perfis de vorticidade e velocidade, sendo que houve maior interesse em estudar a influência do vento numa componente mais global. Para o estudo da influência de pouca vegetação, foi necessário recorrer a simulações 3D mais exigentes com a presença de um cilindro no centro do canal, de modo a simular uma zona com pouca vegetação. Neste caso, foi necessário analisar aspetos adicionais como o arrasto causado no cilindro e o perfil de velocidades na direção da largura do canal. Devido à exigência computacional da simulação e dos recursos disponíveis, foi simulada apenas uma condição.

Para ser possível analisar todos estes parâmetros e quantificar os efeitos destes agentes externos, foi necessário desenvolver códigos Matlab e adaptar códigos no *software* de simulação de modo a integrar o modelo de turbulência pretendido. Todos estes códigos desenvolvidos encontram-se detalhados nos apêndices.

6.2 Conclusões

Em seguida apresentam-se as principais conclusões deste estudo:

- O estudo de sensibilidade da malha mostrou-se relevante na escolha da malha a utilizar, apesar da diferença no número de elementos da malha não ter impacto significativo na velocidade da frente da corrente. No entanto, tem grande influência na estrutura da corrente, nomeadamente no que diz respeito à formação de vórtices de Kelvin-Helmholtz. Ao utilizar a malha mais refinada, foi possível observar com maior detalhe a mistura que acontece entre os dois fluidos e as vorticidades que se formam na interface entre estes. O modelo numérico utilizado e o *software* Open-FOAM conseguem descrever corretamente e de forma coerente o fenómeno das correntes de densidade. Obtiveram-se erros relativos da ordem dos 5% da comparação do número de Froude numérico com o experimental. A presença de superfície livre no domínio da simulação insere turbulência na estrutura, reduzindo ligeiramente a velocidade da frente da corrente e provocando oscilações do seu valor em torno do valor obtido na ausência de superfície livre. Provoca também um maior grau de mistura entre os dois fluidos e uma menor integridade da frente da corrente. A magnitude da vorticidade é mais elevada no caso com superfície livre e o seu pico encontra-se a 20% da altura do canal.
- Verifica-se que o vento induz rotação no escoamento e, dependendo do seu sentido, influencia negativa ou positivamente a velocidade da frente da corrente. Quando o vento tem o mesmo sentido que a corrente, induz uma rotação no sistema no sentido horário e provoca uma redução da velocidade da frente da corrente, sendo este efeito bastante notável a partir de velocidades da ordem dos 6 m/s. O vento no sentido da corrente contribui também para a existência de massa de fluido denso em suspensão, que se traduz numa menor quantidade de movimento da corrente. Quanto mais intenso for o efeito do vento, menor será o valor da velocidade da frente

da corrente. Nos instantes iniciais, a aceleração da corrente é bastante superior para o caso onde não existe influência do vento. Para os instantes finais, verifica-se que a aceleração da frente da corrente torna-se variável e fica mais negativa. Este efeito é mais intenso quanto maior for a velocidade do vento. Quando o vento circula em regime de contra-corrente, o efeito é oposto. Induz uma rotação no escoamento no sentido anti-horário e provoca um aumento da velocidade da corrente. Neste caso, a existência de massa de fluido denso em suspensão já não se verifica. Nos instantes iniciais, o escoamento na presença de vento comporta-se de maneira diferente, evidenciando valores negativos de velocidade, seguidos de uma elevada aceleração até a corrente atingir a fase com velocidade constante e aceleração nula. Nos instantes finais, não se notaram diferenças significativas no caso com vento em contra-corrente, comparando com o caso com superfície livre sem vento. Observou-se que alterando os valores da velocidade do vento, o número de Froude varia de forma diferente para valores de velocidade à superfície de $0 < u_s < 0,1$ e de $u_s > 0,1$.

- A vegetação provoca perturbações locais na corrente de densidade na zona em que o cilindro foi colocado. Notou-se que nos instantes próximos do impacto com o cilindro, a velocidade deixa de ser aproximadamente constante ao longo da altura e largura da frente da corrente. O cilindro provoca uma recirculação das camadas laterais de fluido denso para o centro do canal, após o impacto. Cerca de 5 segundos depois, o perfil de velocidades na direção da largura do canal já se encontra estabilizado e aproximadamente constante ao longo de toda a largura. A presença do cilindro tem também influência nos perfis de vorticidade da corrente, que apresentam agora mais que um pico, ao contrário daqueles verificados nos casos sem cilindro. Em relação ao arrasto, verificou-se um comportamento fortemente não estacionário, com vários picos no coeficiente de arrasto. Apesar das diferenças apresentadas, concluiu-se que uma fração volumica de vegetação de 0,2% não é suficiente para provocar alterações significativas quer na forma macroscópica da estrutura, quer na evolução da posição e da velocidade da frente da corrente.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

O estudo presente nesta dissertação evidencia alguns aspetos fundamentais sobre o efeito do vento e da vegetação no comportamento de correntes de densidade, ajudando a compreender o fenómeno, visto que não existe ainda muita informação disponível e estudos desenvolvidos nesta área. No entanto, devido às limitações deste estudo, em termos de tempo disponível e de recursos computacionais, não foi possível realizar todos os testes numéricos pretendidos, pelo que são sugeridas em seguida algumas direções possíveis de seguir em futuros trabalhos:

- Em todos os testes numéricos realizados com efeito do vento, apenas se considerou o valor da gravidade reduzida de $0,12 \text{ m/s}^2$. Portanto, é interessante estudar

a influência deste parâmetro no escoamento e a forma como afeta a resistência do escoamento ao efeito do vento. Seria interessante estudar também o comportamento da corrente de densidade no caso em que o fluido ambiente já se encontra em contacto com o vento antes de ser aberta a comporta do fluido denso. Deste modo, o fluido ambiente já se encontra com movimento e pode afetar de maneira diferente a corrente de densidade. Uma comparação com resultados experimentais de outras dissertações realizadas no mesmo período de tempo que a presente dissertação será também possível e interessante de fazer em trabalhos futuros.

- Na Tabela 5.1 apresenta-se o número de testes possíveis de realizar de modo a estudar a influência do vento e da vegetação com mais detalhe: refere-se à realização de vinte e quatro simulações com um cilindro isolado sem vento (quatro valores diferentes de gravidade reduzida, três valores diferentes de diâmetro do cilindro e dois comprimentos diferentes para a localização do cilindro); outras vinte e quatro simulações para a variante com vento (estudar a variação da gravidade reduzida, distância de localização do cilindro e velocidade do vento); doze simulações para um conjunto de cilindros sem efeito do vento (estudar a variação da gravidade reduzida e do espaçamento entre cilindros, quer na direção y , quer na direção x); trinta e seis simulações para um conjunto de cilindros com efeito do vento (estudar a variação da gravidade reduzida, espaçamento entre cilindros e velocidade do vento). O número de testes a realizar advém das várias combinações possíveis das variáveis já referidas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Adduce, G. Sciortino e S. Proietti. “Gravity currents produced by lock exchanges: experiments and simulations with a two-layer shallow-water model with entrainment”. Em: *Journal of Hydraulic Engineering* 138.2 (2012), pp. 111–121.
- [2] D. B. “Densimetric exchange flow in rectangular channels”. Em: *La Houille Blanche* 6 (1967), pp. 619–632.
- [3] T. B. Benjamin. “Gravity currents and related phenomena”. Em: *Journal of Fluid Mechanics* 31.2 (1968), pp. 209–248.
- [4] K. Bhaganagar. “Direct numerical simulation of lock-exchange density currents over the rough wall in slumping phase”. Em: *Journal of hydraulic research* 52.3 (2014), pp. 386–398.
- [5] K. Bhaganagar e N. R. Pillalamarri. “Lock-exchange release density currents over three-dimensional regular roughness elements”. Em: *Journal of Fluid Mechanics* 832 (2017), pp. 793–824.
- [6] F. A. Bombardelli, M. I. Cantero, M. H. Garcia e G. C. Buscaglia. “Numerical aspects of the simulation of discontinuous saline underflows: the lock-exchange problem”. Em: *Journal of Hydraulic Research* 47.6 (2009), pp. 777–789.
- [7] M. I. Cantero, S. Balachandar, M. H. García e J. P. Ferry. “Direct numerical simulations of planar and cylindrical density currents”. Em: (2006).
- [8] M. I. Cantero, J. Lee, S. Balachandar e M. H. Garcia. “On the front velocity of gravity currents”. Em: *Journal of Fluid Mechanics* 586 (2007), pp. 1–39.
- [9] S.-U. Choi e M. H. García. “k- ϵ turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope”. Em: *Journal of Hydraulic Engineering* 128.1 (2002), pp. 55–63.
- [10] G. Constantinescu. “LES of lock-exchange compositional gravity currents: a brief review of some recent results”. Em: *Environmental Fluid Mechanics* 14.2 (2014), pp. 295–317.
- [11] D. E. Farrow. “Periodically driven circulation near the shore of a lake”. Em: *Environmental fluid mechanics* 13.3 (2013), pp. 243–255.
- [12] D. E. Farrow. “A numerical model of periodically forced circulation near the shore of a lake”. Em: *Environmental Fluid Mechanics* 16.5 (2016), pp. 983–995.

- [13] G. FORM. "FINITE VOLUME METHODS". Em: ().
- [14] M. Germano, U. Piomelli, P. Moin e W. H. Cabot. "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model". Em: *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* 3.7 (1991), pp. 1760–1765.
- [15] C Gladstone, L. Ritchie, R. Sparks e A. Woods. "An experimental investigation of density-stratified inertial gravity currents". Em: *Sedimentology* 51.4 (2004), pp. 767–789.
- [16] E. Gonzalez-Juez, E. Meiburg e G. Constantinescu. "The interaction of a gravity current with a circular cylinder mounted above a wall: Effect of the gap size". Em: *Journal of Fluids and Structures* 25.4 (2009), pp. 629–640.
- [17] J. Hacker, P. Linden e S. Dalziel. "Mixing in lock-release gravity currents". Em: *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 24.1-4 (1996), pp. 183–195.
- [18] Y. Hallez e J. Magnaudet. "A numerical investigation of horizontal viscous gravity currents". Em: *Journal of fluid mechanics* 630 (2009), pp. 71–91.
- [19] M. A. Hallworth, H. E. Huppert, J. C. Phillips e R. S. J. Sparks. "Entrainment into two-dimensional and axisymmetric turbulent gravity currents". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 308 (1996), pp. 289–311.
- [20] B Henderson-Sellers. "The dependence of surface velocity in water bodies on wind velocity and latitude". Em: *Applied mathematical modelling* 12.2 (1988), pp. 202–203.
- [21] H. Huang, J. Imran e C. Pirmez. "Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary". Em: *Journal of Hydraulic Engineering* 131.4 (2005), pp. 283–293.
- [22] H. E. Huppert. "Gravity currents: a personal perspective". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 554 (2006), p. 299.
- [23] H. E. Huppert e J. E. Simpson. "The slumping of gravity currents". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 99.4 (1980), pp. 785–799.
- [24] J Imran, A Kassem e S. Khan. "Three-dimensional modeling of density current. I. Flow in straight confined and unconfined channels". Em: *Journal of Hydraulic Research* 42.6 (2004), pp. 578–590.
- [25] R. Inghilesi, C. Adduce, V. Lombardi, F. Roman e V. Armenio. "Axisymmetric three-dimensional gravity currents generated by lock exchange". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 851 (2018), pp. 507–544.
- [26] G. H. Keulegan. *Thirteenth progress report on model laws for density currents: an experimental study of the motion of saline water from locks into fresh water channels*. Vol. 5168. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1957.
- [27] B. Kneller e C. Buckee. "The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications". Em: *Sedimentology* 47 (2000), pp. 62–94.

-
- [28] M. La Rocca, C. Adduce, G. Sciortino e A. B. Pinzon. "Experimental and numerical simulation of three-dimensional gravity currents on smooth and rough bottom". Em: *Physics of Fluids* 20.10 (2008), p. 106603.
- [29] Y.-T. Lin. "Wind effect on diurnal thermally driven flow in vegetated nearshore of a lake". Em: *Environmental Fluid Mechanics* 15.1 (2015), pp. 161–178.
- [30] M. Mahdinia, B. Firoozabadi, M. Farshchi, A. G. Varnamkhasti e H. Afshin. "Large eddy simulation of Lock-Exchange flow in a curved channel". Em: *Journal of Hydraulic Engineering* 138.1 (2012), pp. 57–70.
- [31] G. V. Middleton. "Experiments on density and turbidity currents: I. Motion of the head". Em: *Canadian Journal of Earth Sciences* 3.4 (1966), pp. 523–546.
- [32] G. V. Middleton. "Experiments on density and turbidity currents: II. Uniform flow of density currents". Em: *Canadian Journal of Earth Sciences* 3.5 (1966), pp. 627–637.
- [33] G. V. Middleton. "Sediment deposition from turbidity currents". Em: *Annual review of earth and planetary sciences* 21.1 (1993), pp. 89–114.
- [34] F. Necker, C. Härtel, L. Kleiser e E. Meiburg. "High-resolution simulations of particle-driven gravity currents". Em: *International Journal of Multiphase Flow* 28.2 (2002), pp. 279–300.
- [35] F. Necker, C. Härtel, L. Kleiser e E. Meiburg. "Mixing and dissipation in particle-driven gravity currents". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 545 (2005), p. 339.
- [36] H. M. Nepf e C. E. Oldham. "Exchange dynamics of a shallow contaminated wetland". Em: *Aquatic sciences* 59.3 (1997), pp. 193–213.
- [37] S. K. Ooi, G. Constantinescu e L. J. Weber. "2D large-eddy simulation of lock-exchange gravity current flows at high Grashof numbers". Em: *Journal of Hydraulic Engineering* 133.9 (2007), pp. 1037–1047.
- [38] S. K. Ooi, G. Constantinescu e L. Weber. "Numerical simulations of lock-exchange compositional gravity current". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 635 (2009), p. 361.
- [39] A. Y. Ozan, G. Constantinescu e A. J. Hogg. "Lock-exchange gravity currents propagating in a channel containing an array of obstacles". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 765 (2015), pp. 544–575.
- [40] J. Pelmard, S. Norris e H. Friedrich. "LES grid resolution requirements for the modelling of gravity currents". Em: *Computers & Fluids* 174 (2018), pp. 256–270.
- [41] J. W. Rottman e J. E. Simpson. "Gravity currents produced by instantaneous releases of a heavy fluid in a rectangular channel". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 135 (1983), pp. 95–110.
- [42] J. Shin, S. Dalziel e P. Linden. "Gravity currents produced by lock exchange". Em: *Journal of Fluid Mechanics* 521 (2004), p. 1.

- [43] N Silvestre. “The structure of gravity currents propagating in finite domains”. Tese de mestrado. Instituto Superior Técnico, 2017, p. 98.
- [44] J. Smagorinsky. “General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment”. Em: *Monthly weather review* 91.3 (1963), pp. 99–164.
- [45] G. Solis. “Gravity Currents Propagating Over and Within a Porous Bed”. Tese de mestrado. Università Roma Tre, 2018, p. 94.
- [46] Y. Tanino, H. Nepf e P. Kulis. “Gravity currents in aquatic canopies”. Em: *Water resources research* 41.12 (2005).
- [47] B. Woodward, C. Marti, J Imberger, M. Hipsey e C. Oldham. “Wind and buoyancy driven horizontal exchange in shallow embayments of a tropical reservoir: Lake Argyle, Western Australia”. Em: *Limnology and Oceanography* 62.4 (2017), pp. 1636–1657.
- [48] X. Zhang e H. M. Nepf. “Density-driven exchange flow between open water and an aquatic canopy”. Em: *Water Resources Research* 44.8 (2008).
- [49] X. Zhang e H. M. Nepf. “Thermally driven exchange flow between open water and an aquatic canopy”. Em: *Journal of fluid mechanics* 632 (2009), p. 227.
- [50] X. Zhang e H. M. Nepf. “Exchange flow between open water and floating vegetation”. Em: *Environmental Fluid Mechanics* 11.5 (2011), p. 531.
- [51] Y. Zhiyin. “Large-eddy simulation: Past, present and the future”. Em: *Chinese journal of Aeronautics* 28.1 (2015), pp. 11–24.
- [52] J. Zhou. “Physics of environmental flows interacting with obstacles”. Em: *2000-2019-CSU Theses and Dissertations* (2017).
- [53] J. Zhou, C. Cenedese, T. Williams, M. Ball, S. K. Venayagamoorthy e R. I. Nokes. “On the propagation of gravity currents over and through a submerged array of circular cylinders”. Em: *Journal of Fluid Mechanics* 831 (2017), pp. 394–417.



CÓDIGOS MATLAB

```
clc
clear
close all

dt = 0.02;
t = dt:dt:30;
nmax = (max(t) - min(t) + dt)/dt;
for n=1:nmax

    alpha = importdata([DIRETORIO\postProcessing\
    positionfront\' num2str(t(n)) '\alpha.salt_interpolatedIso.raw'], ' ', 2);
    alpha_data = alpha.data;
    wave_pos(n) = max(alpha_data(:,1));

end

vector(:,1) = t;
vector(:,2) = wave_pos;

fid = fopen('alpha_salt.dat','wt'); % escrever o ficheiro txt
fprintf(fid,'%d\t%d\n', vector. ');
fclose(fid);
close all
helpdlg('O ficheiro encontra-se na directória corrente','Informação');
disp('END')
```

Figura A.1: Código Matlab para filtrar os dados da posição da frente de corrente sem o efeito do vento.

```

clc
clear
close all

dt = 0.02;
t = dt:dt:30;
nmax = (max(t) - min(t) + dt)/dt;
for n=1:nmax

    alpha = importdata([DIRETORIO\postProcessing\positionfrontv
    \' num2str(t(n)) \' \alpha.salt_interpolatedIso.raw'], ' ', 2);
    Vel = importdata([DIRETORIO\postProcessing\positionfrontv
    \' num2str(t(n)) \' \U_interpolatedIso.raw'], ' ', 2);
    Vel_data = Vel.data;
    alpha_data = alpha.data;
    [wave_pos(n), index_pos(n)] = max(alpha_data(:,1));
    u(n) = Vel_data(index_pos(n),4);
    v(n) = Vel_data(index_pos(n),5);
    w(n) = Vel_data(index_pos(n),6);

end

vector(:,1) = t;
vector(:,2) = u;

fid = fopen('vel_salt.dat','wt'); % escrever o ficheiro txt
fprintf(fid,'%d\t%d\n', vector. ');
fclose(fid);
close all
helpdlg('O ficheiro encontra-se na directória corrente','Informação');
disp('END')

```

Figura A.2: Código Matlab para filtrar os dados da velocidade da frente de corrente sem o efeito do vento.

```

clc
clear
close all

dt = 0.02;
t = dt:dt:30;
nmax = (max(t) - min(t) + dt)/dt;
for n=1:nmax

    alpha = importdata([DIRETORIO\postProcessing\
    positionfrontv\' num2str(t(n)) \' \alpha.salt_interpolatedIso.raw'], ' ', 4);
    alpha_data = alpha.data;
    pos(n)=0;
    l=size(alpha_data,1);
    for i=1:l
        if alpha_data(i,1)>pos(n) && alpha_data(i,3)<0.15
            pos(n)=alpha_data(i,1);
        else
            continue
        end
    end
end

vector(:,1) = t;
vector(:,2) = pos;

fid = fopen('alpha_salt.dat','wt'); % escrever o ficheiro txt
fprintf(fid,'%d\t%d\n', vector. ');
fclose(fid);
close all
helpdlg('O ficheiro encontra-se na directória corrente','Informação');
disp('END')

```

Figura A.3: Código Matlab para filtrar os dados da velocidade da frente de corrente com efeito do vento.

```
clc
clear
close all

dt = 0.02;
t = dt:dt:30;
nmax = (max(t) - min(t) + dt)/dt;
for n=1:nmax

    alpha = importdata(['DIRETORIO\postProcessing\
    positionfrontv\' num2str(t(n)) '\alpha.salt_interpolatedIso.raw'], ' ', 4);
    Vel = importdata(['DIRETORIO\postProcessing\
    positionfrontv\' num2str(t(n)) '\U_interpolatedIso.raw'], ' ', 2);
    Vel_data = Vel.data;
    alpha_data = alpha.data;
    pos(n)=0;
    l=size(alpha_data,1);
    index=0;
    for i=1:l
        if alpha_data(i,1)>pos(n) && alpha_data(i,3)<0.15
            index(n)=i;
        else
            continue
        end
    end
    u(n) = Vel_data(index(n),4);
    v(n) = Vel_data(index(n),5);
    w(n) = Vel_data(index(n),6);

end

vector(:,1) = t;
vector(:,2) = u;

fid = fopen('vel_salt.dat','wt'); % escrever o ficheiro txt
fprintf(fid,'%d\t%d\n', vector. ');
fclose(fid);
close all
helpdlg('O ficheiro encontra-se na directória corrente','Informação');
disp('END')
```

Figura A.4: Código Matlab para filtrar os dados da velocidade da frente de corrente com efeito do vento.

CÓDIGOS OPENFOAM

```
positionfront
{
    interpolationScheme cell;
    type surfaces;
    functionObjectLibs ("libsampling.so");
    outputControl outputTime;
    surfaceFormat raw;
    fields
    (
        alpha.salt
    );
    surfaces
    (
        interpolatedIso
        {
            // Iso surface for interpolated values only
            type isoSurface; // always triangulated
            isoField alpha.salt;
            isoValue 0.5;
            interpolate true;
            regularise true;
        }
    );
};
```

Figura B.1: Código OpenFOAM para obtenção dos dados relativos à posição da frente de corrente.

```
positionfrontv
{
    interpolationScheme cell;
    type surfaces;
    functionObjectLibs ("libsampling.so");
    outputControl outputTime;
    surfaceFormat raw;
    fields
    (
        alpha.salt
        U
    );
    surfaces
    (
        interpolatedIso
        {
            // Iso surface for interpolated values only
            type isoSurface; // always triangulated
            isoField alpha.salt;
            isoValue 0.5;
            interpolate true;
            regularise true;
        }
    );
};
```

Figura B.2: Código OpenFOAM para obtenção dos dados relativos à velocidade da frente de corrente.

```
velocityprofile
{
    start (2 0 0);
    end (2 0 0.2);
    fields (U);

    #includeEtc "caseDicts/postProcessing/graphs/sampleDict.cfg"

    setConfig
    {
        axis z;
    }

    // Must be last entry
    #includeEtc "caseDicts/postProcessing/graphs/graph.cfg"
}
```

Figura B.3: Código OpenFOAM para obtenção dos dados relativos aos perfis de velocidade.



ÁRVORE DE DIRETORIAS DE UMA SIMULAÇÃO EM OPENFOAM



CÓDIGO ADAPTADO PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA LES PARA O *solver* *interMixingFoam*

```

simulationType LES;

LES
{
    LESModel      Smagorinsky;

    turbulence     on;

    printCoeffs   on;

    delta         cubeRootVol;

    cubeRootVolCoeffs
    {
        deltaCoeff 1;
    }

    PrandtlCoeffs
    {
        delta         cubeRootVol;

        cubeRootVolCoeffs
        {
            deltaCoeff 1;
        }

        smoothCoeffs
        {
            delta         cubeRootVol;

            cubeRootVolCoeffs
            {
                deltaCoeff 1;
            }

            maxDeltaRatio 1.1;
        }

        Cdelta      0.158;
    }
}

vanDriestCoeffs
{
    delta         cubeRootVol;

    cubeRootVolCoeffs
    {
        deltaCoeff 1;
    }

    smoothCoeffs
    {
        delta         cubeRootVol;

        cubeRootVolCoeffs
        {
            deltaCoeff 1;
        }

        maxDeltaRatio 1.1;
    }

    Aplus      26;
    Cdelta     0.158;
}

smoothCoeffs
{
    delta         cubeRootVol;

    cubeRootVolCoeffs
    {
        deltaCoeff 1;
    }

    maxDeltaRatio 1.1;
}

```

Figura D.1: Código adaptado para utilização do modelo de turbulência LES para o *solver* *interMixingFoam* .